

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Univerzitní studijní programy

Studijní program Mechatronika

Embedded řídicí systém hydraulického pohonu

Embedded Control System of the Hydraulic Drive

Student:

Bc. Michal Szymeczek

Vedoucí diplomové práce:

Prof. Ing. Petr Noskievič, CSc.

Ostrava 2012

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Szymeczek**  
Studijní program: N3943 Mechatronika  
Studijní obor: 3906T006 Mechatronické systémy  
Téma: **Embedded řídicí systém hydraulického pohonu**  
**Embedded Control System of the Hydraulic Drive**

### Zásady pro vypracování:

1. Proveďte analýzu úloh řízení strojů s hydraulickými pohony s ohledem na specifikaci vlastností řídicího systému. Uvažujte přitom i realizaci zpětnovazebního řízení pomocí regulačního ventilu a měření regulované veličiny.
2. Proveďte popis pásových pil na řezání kovu, charakterizujte úlohu řídicího systému a proveďte základní popis procesu řezání kovu.
3. Proveďte analýzu a sestavení simulačního modelu hydraulického pohonu pro řízení posuvu pilového pásu u pásových pil na řezání kovu.
4. Simulační model připravte pro jeho využití v rámci návrhu a ověřování algoritmu řízení metodou hardware in the loop.
5. Proveďte návrh a realizaci embedded řídicího systému a algoritmu řízení pro řízení posuvu pilového pásu u pásových pil na řezání kovu.
6. Proveďte funkční ověření navrhnutého řídicího systému metodou hardware in the loop a v rámci laboratorních možností ověření jeho dílčích funkcí ve spojení s reálnými akčními členy a snímači.
7. Proveďte zhodnocení dosažených výsledků a možnosti jejich využití v průmyslové praxi.

### Seznam doporučené odborné literatury:

Lewin A.R.W. Edwards. Embedded system design on a shoestring: achieving high performance with a limited budget. New York : Newnes, 2003, 232 s. ISBN 0-7506-7609-4  
Ken Arnold. - Eagle Rock: Embedded controller hardware design. LLH Technology Publishing, 2001, 232 s. . il. + 1 CD-ROM ISBN 1-878707-52-3  
Jim Ledin. Embedded control systems in C/C++ : An introduction for software developers using MATLAB - San Francisco : CMP Books, 2004 , 239 s.. 1 CD-ROM ISBN 1-57820-127-6.  
Nepřaž,F.-Nevrlý, J.-Peňáz,V.-Třetina,K.: Modelování systémů s hydraulickými mechanismy. Bosch Rexroth, spol.s.r.o., Brno, 2002. ISBN 80-214-2187-8.  
Noskiewič, P.: Modelování a identifikace systémů. I.vydání, Ostrava, MONTANEX a.s., 1999, ISBN 80-7225-030-2.  
Firemní literatura a dokumentace k pásovým pilám na řezání kovu.  
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Petr Noskiewič, CSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012

prof. Ing. Jiří Tůma, CSc.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Petr Noskiewič, CSc.  
prorektor pro studium

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 21. 5. 2012



Michal Szymeczek

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněními užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 21. 5. 2012



Michal Szymeczek

Michal Szymeczek

Rožnovská 344

Frenštát pod Radhoštěm

74401

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

SZYMECZEK, M. *Embedded řídicí systém hydraulického pohonu: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Univerzitní studijní programy, Studijní program Mechatronika, 2012, 61 s. Vedoucí práce: Noskievič, P.

Diplomová práce se zabývá návrhem řídicího systému pro hydraulické pohony. Jako řídicí systém byl vybrán jednodeskový vestavěný (embedded) počítač Athena II SBC od firmy Diamond Systems vhodný pro umístění do náročných průmyslových podmínek. Řídicí systém byl použit pro řízení pásových pil na řezání kovu. Pro návrh, a zejména ověření, řídicích algoritmů byla použita metoda simulace Hardware in the Loop. Pro tuto metodu bylo nutno sestavit matematický model, včetně zjednodušeného popisu řezání. Řídicí algoritmy, navržené metodou HiL, byly ověřeny v laboratorních podmínkách se snahou o maximální shodu sestaveného hydraulického obvodu se skutečným obvodem pásové pily na řezání kovu.

## ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

SZYMECZEK, M. *Embedded Control System of the Hydraulic Drive: Diploma Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, University Study Programmes, Study Programme of Mechatronics, 2012, 61 p. Thesis head: Noskievič, P.

The diploma thesis deals with the design of control system for hydraulic drives. Single-board embedded microcomputer Athena II SBC from Diamond Systems was chosen as a control system suitable to locate in difficult industrial conditions. The control system was used for control of a band saw for metal cutting. The Hardware in the Loop simulation was used for design and verification of control algorithm. The mathematical model, including a cutting, was necessary for this method. The control algorithm was validated in laboratory conditions with a goal to maximal coincidence of the constructed hydraulic circuit with a real circuit of a band saw for metal cutting.

## Obsah

Seznam použitých zkratk	8
Seznam použitého značení	9
1 Úvod	11
2 Řízení strojů hydraulickými pohony	12
2.1 Řídicí systémy hydraulických pohonů	13
2.2 Hydraulický regulační ventil	14
2.3 Měření regulované veličiny	16
3 Embedded řídicí systém	20
3.1 Použití embedded řídicích systémů	20
4 Pásové pily na řezání kovu	22
4.1 Manuální	22
4.2 Poloautomatické	24
4.3 Automatické	25
4.4 Popis procesu řezání kovu	27
5 Hydraulický pohon pásových pil na řezání kovu	29
5.1 Model hydraulického pohonu	30
5.2 Úprava modelu pro HiL simulaci	31
6 Návrh řídicího systému	34
6.1 Tvorba obrazu operačního systému pro řídicí systém	37
6.2 Nahrání operačního systému na Flash disk	40
6.3 Servisní přístup k řídicímu systému	41
6.4 Komunikace s nadřazeným řídicím systémem	42
7 Návrh algoritmu řízení	43
7.1 Metoda kritických parametrů	44
7.2 Metoda překmitu	44
8 Ověření navrženého řídicího algoritmu	46
8.1 Programování řídicího systému	46

8.2	Použití knihoven pro AD a DA převodník.....	47
8.3	Perioda vzorkování číslicového regulátoru.....	48
8.4	Simulace HiL .....	49
8.5	Připojení řídicího systému k elektrohydraulickému stendu.....	55
8.6	Připojení řídicího systému k agregátu pásové pily na řezání kovu.....	56
9	Závěr.....	61
10	Seznam použité literatury .....	63
11	Seznam příloh .....	66

## Seznam použitých zkratk

ADC	Analogově digitální převod ( <i>Analog to Digital Converter</i> )
DAC	Digitálně analogový převod ( <i>Digital to Analog Converter</i> )
HiL	<i>Hardware in the Loop</i>
IDE	<i>Integrated Drive Electronics</i>
LAFCH	Logaritmická amplitudová frekvenční charakteristika
LVDT	Lineární diferenciální transformátor ( <i>Linear Variable Differential Transformer</i> )
MPM	Metoda požadovaného modelu
OS	Operační systém ( <i>Operating System</i> )
PDA	Osobní digitální pomocník ( <i>Personal Digital Assistant</i> )
PC	Osobní počítač ( <i>Personal Computer</i> )
PCI	<i>Peripheral Component Interconnect</i>
PLC	Programovatelný automat ( <i>Programmable Logic Controller</i> )
RDP	Protokol vzdálené plochy ( <i>Remote Desktop Protocol</i> )
SBC	Jednodeskový počítač ( <i>Single-Board Computer</i> )
SSI	Synchronní sériové rozhraní ( <i>Synchronous Serial Interface</i> )



## Seznam použitého značení

$B$	průtokové zesílení	$\left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \sqrt{\text{Pa}}} \right]$
$e(kT)$	nespojité regulační odchylka	$[\text{V}]$
$F_{\text{H}}$	hydraulická síla	$[\text{N}]$
$F_{\text{Ř}}$	řezná síla	$[\text{N}]$
$G_{\text{i}}$	interní svodová propustnost hydromotoru	$\left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{Pa}} \right]$
$f_{\text{HM}}$	vlastní frekvence hydromotoru	$[\text{Hz}]$
$f_{\text{SV}}$	vlastní frekvence servoventilu	$[\text{Hz}]$
$k$	počet zubů v záběru	$[-]$
$k_{\text{p}}$	tuhost pružiny (pilového pásu)	$\left[ \frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$
$K_{\text{Qx}}$	průtokové zesílení	$\left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$
$p_{\text{A}}$	tlak v komoře A hydromotoru	$[\text{Pa}]$
$p_{\text{B}}$	tlak v komoře B hydromotoru	$[\text{Pa}]$
$\Delta p_{\text{i}}$	tlakový spád v i-tém směru	$[\text{Pa}]$
$Q_{\text{i}}$	průtok v i-tém směru	$\left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$
$S_{\text{A}}$	plocha strany A hydromotoru	$[\text{m}^2]$
$S_{\text{B}}$	plocha strany B hydromotoru	$[\text{m}^2]$
$T_{\text{SV}}$	časová konstanta servoventilu	$[\text{s}]$

$u(t)$	akční veličina	[V]
$u(kT)$	nespojité akční veličina	[V]
$w(kT)$	nespojité žádaná veličina	[V]
$x_{sv}$	poměrná poloha šoupátka servoventilu	[-]
$x_{sv0}$	krytí šoupátka servoventilu	[-]
$y(t)$	regulovaná veličina	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$
$y(kT)$	nespojité (tvarovaná) regulovaná veličina	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$
$\xi_{sv}$	součinitel poměrného tlumení servoventilu	[-]

# 1 Úvod

Diplomová práce se zabývá vestavěným (embedded) řídicím systémem pro hydraulické pohony. V úvodní popisné části jsou analyzovány úlohy řízení strojů s hydraulickými pohony a rozebrány výhody a nevýhody použití hydraulických pohonů ve srovnání s jinými typy pohonů. U hydraulických pohonů je stěžejním řídicím prvkem regulační ventil, v práci je proveden popis jeho vlastností, zejména pak těch, které jsou potřeba pro sestavení matematického modelu. Na závěr kapitoly jsou představeny principy využívané k měření regulované veličiny.

V další kapitole je seznámení s pojmem embedded řídicí systém. Jsou vypsány vlastnosti takového řídicího systému a příklady jeho použití. Chybět nebudou ani požadavky kladené na řídicí systém pro hydraulické pohony.

Další část diplomové práce se zabývá konkrétní aplikací hydraulických pohonů, pásovými pilami na řezání kovu. Pásové pily na řezání kovu mohou hydraulické pohony využívat k více činnostem. Tou hlavní je řízení posuvu pilového pásu během procesu řezání. Pro tuto činnost je popsán používaný hydraulický obvod a princip jeho činnosti. Sestaven bude i matematický model hydraulického obvodu pro fázi řezání včetně zjednodušeného popisu řezání.

Na základě všech požadavků je proveden výběr řídicího systému. Tento řídicí systém je potřeba uvést do provozu, seznámit se s jeho funkcemi a hlavně způsobem programování tak, aby mohl být naprogramován program pro řízení.

Pomocí matematického modelu jsou navrženy řídicí algoritmy. K ověření je využita simulace Hardware in the Loop (HiL), poté je provedeno ověření na reálném zařízení. Toto otestování probíhá v laboratorních podmínkách a ne přímo na pásové pile na řezání kovu. Snahou je upravit použitý hydraulický obvod tak, aby co nejvěrněji simuloval chování hydraulického obvodu, který se u pásových pil používá.

Na závěr práce jsou shrnuty všechny dosažené výsledky včetně možnosti jejich využití v průmyslové praxi.

## 2 Řízení strojů hydraulickými pohony

Hydraulické pohony se používají k řízení různých strojů a zařízení. Příklady aplikací lze nalézt například v [PAVLOK, 2007; WARRING, 1983; BACKÉ, 1992], kde jsou uvedeny aplikace v následujících oborech:

- doprava (brzdy, letectví, posilovače řízení),
- průmysl (doprava a manipulace s materiálem, hlubinné a povrchové dobývání surovin, lehký průmysl, metalurgie, strojírenství, těžba ropy a plynu),
- vojenství (kotvení lodí, palubní zařízení),
- zemědělství, lesnictví, stavebnictví (mobilní stroje),
- manipulační technika (roboty, jednoúčelové mechanismy pro pomocné funkce výrobních strojů),
- technická zařízení kulturních a společenských sálů, zábavní techniky, simulátory a další (divadelní technika, zkušební stroje).

Důležité je znát výhody a nevýhody pohonů s hydraulickými akčními členy, které nám určují možnosti použití v dané situaci. V [BACKÉ, 1992] jsou uvedeny tyto základní výhody:

- malé zástavové prostory,
- velké vyvozované síly,
- rychlé přepravování velkých hmot velkou rychlostí,
- přímočarý pohyb vyráběných pohonů,
- jednoduché řízení polohy, rychlosti, otáček, výkonu, momentu, síly, směru pohybu apod.

Tak jako všechny ostatní, mají i hydraulické pohony své nedostatky, patří mezi ně [KOPÁČEK, 2005]:

- velké nároky na čistotu pracovní kapaliny,
- změna vlastností pracovní kapaliny při změně teploty,
- netěsnost, nepříznivý vliv úniku oleje na životní prostředí,
- řízení pohybových veličin pomocí škrcení, čímž vznikají energetické ztráty, které se snaží minimalizovat různé energeticky méně náročné koncepce hydraulických obvodů.

Hlavním úkolem řídicího systému je řídit regulovanou veličinu. Tou je u hydraulických pohonů poloha, méně často pak rychlost, popř. jiná veličina (tlak, síla).

## 2.1 Řídicí systémy hydraulických pohonů

K řízení hydraulických pohonů lze použít různé řídicí systémy, v závislosti na požadavcích, které určuje konkrétní aplikace. Většina dnes realizovaných hydraulických pohonů sleduje trend používání proporcionální nebo servotechniky místo klasické řídicí techniky.

Klasická řídicí technika se dnes používá již minimálně. Převážná většina aplikací je dnes založena na proporcionální řídicí technice (používá proporcionální řídicí ventily, proporcionální tlakové, škrticí ventily apod.), v nejnáročnějších aplikacích pak na servotechnice (používá servoventily). Důležitou vlastností společnou pro obě kategorie (proportionální a servotechnika) je řízení spojitým elektrickým signálem malého výkonu.

I ten nejjednodušší řídicí systém pro hydraulické pohony musí vykonávat tyto základní operace:

- snímat regulovanou veličinu (nejčastěji snímače polohy popř. otáček),
- počítat řídicí algoritmus (základem je PID regulátor, dále pak stavové řízení, synchronizace řízení více pohonů apod.),
- generuje akční veličinu (ve skutečnosti je kvůli použití  $n$ -bitového D/A převodníku akční veličina tzv. tvarovaná [VÍTEČEK, VÍTEČKOVÁ, 2008]).

Kromě základních operací často po řídicím systému vyžadujeme další funkce, např.:

- komunikace s nadřazeným řídicím systémem (např. přes sériovou linku RS232, CAN, Profibus apod.),
- vizualizace,
- autokalibrace,
- autonomní chod.

## 2.2 Hydraulický regulační ventil

Pojmem regulační ventil zde budeme chápat hydraulické ventily pro plynulou regulaci průtoku. Abychom byli schopni docílit plynulé regulace průtoku, musíme mít možnost měnit plynule průtočný průřez ventilu. Tato plynulá (spojitá) změna se neprovádí ručně, nýbrž elektricky. Přivedením elektrického signálu malého výkonu tedy proporcionálně řídíme průtok dodávaný regulačním ventilem. Vlastnosti regulačních ventilů popíšeme jak z hlediska konstrukce, tak z hlediska vlastností podstatných pro sestavení matematického modelu.

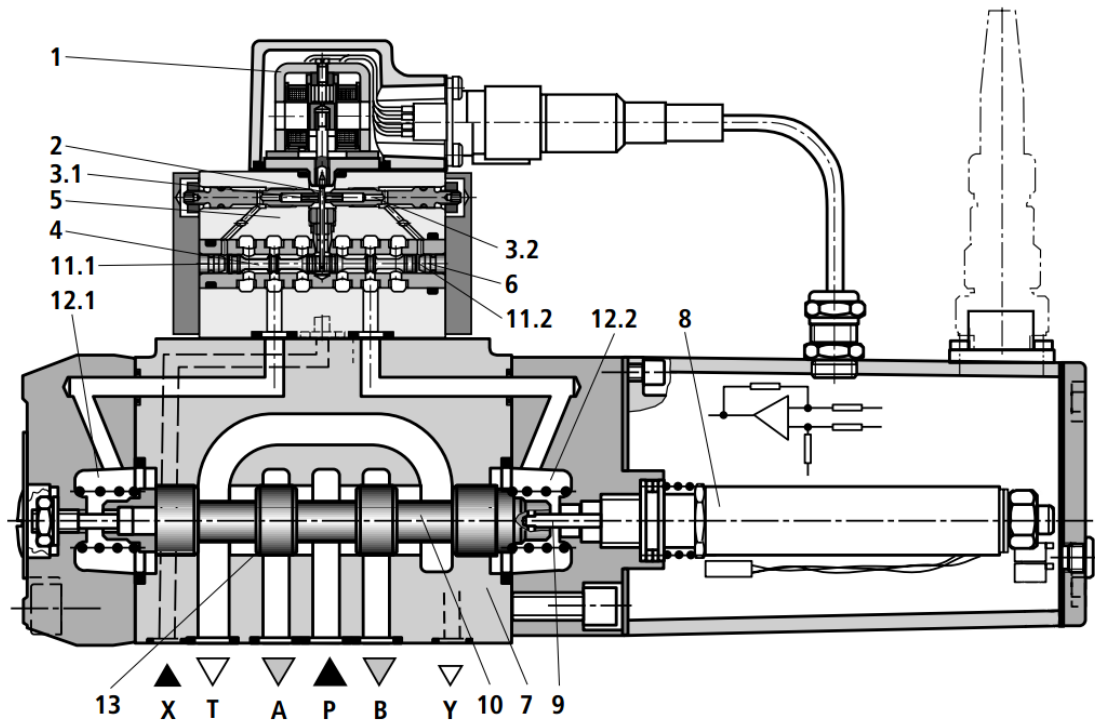
Spojitá změna průtoku si vyžaduje použití proporcionální řídicí techniky, popř. servotechniky. Klasická řídicí technika v hydrostatických systémech nestačí, jelikož s ní nejsme schopni dosáhnout plynulé změny průtoku, ale pouze skokové. Mezi regulační ventily lze zařadit tyto ventily:

- proporcionální škrťací ventily,
- proporcionální rozváděče,
- servoventily.

Jelikož je regulační ventil řízen elektrickým signálem, musí obsahovat nějaký elektromechanický převodník. Jako elektromechanický převodník lze použít [PAVLOK, 2010]:

- proporcionální elektromagnety (proporcionální, silové, zdvihové),
- lineární motor,
- elektrodynamický převodník,
- krokový motor,
- momentový motor.

V řezu se provedení šoupátka, které představuje hlavní část rozváděče, regulačního ventilu a klasického rozváděče příliš neliší. Rozdíl je v použití drážek u regulačních ventilů, kterými upravujeme statickou charakteristiku ventilu. Tu požadujeme lineární (obdélníkové drážky), ovšem někdy je žádoucí progresivnější charakteristika (trojúhelníkové drážky). Konstrukce regulačních ventilů je podrobně popsána např. v [PAVLOK, 2010]. Do průtoků zhruba  $60 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  se regulační ventily vyrábějí přímo řízené, nad tyto průtoky pak jako nepřímě řízené (vícestupňové). Na obrázku 2.1 je zobrazen třístupňový proporcionální řídicí ventil s elektrickou zpětnou vazbou polohy šoupátka, výrobcem je firma Bosch-Rexroth.



Obrázek 2.1 Třístupňový řídicí ventil s elektrickou zpětnou vazbou polohy šoupátka [BOSCH-REXROTH, 2007]

Čísla v obrázku popisují následující části regulačního ventilu: 1 – lineární motor, 2 – klapka, 3.1, 3.2 – trysky, 4 – šoupátko 2. stupně, 5 – zesilovač (typu tryska-klapka), 6 – vložka pístu, 7 – 3. stupeň, 8 – snímač polohy, 9 – hřídel snímače polohy, 10 – pístek šoupátka, 11.1, 11.2 – řídicí prostory 2. stupně, 12.1, 12.2 – řídicí prostory 3. stupně, 13 – řídicí hrany.

Simulační model regulačního ventilu je podrobně popsán v [NOSKIEVIČ, 1999]. Zde budou popsány vlastnosti zásadní z pohledu řízení regulačních ventilů v rámci hydraulických pohonů. Regulační ventil vykazuje vlastnosti proporcionálního členu se setrvačností druhého řádu, který lze popsat Laplaceovým přenosem ve tvaru

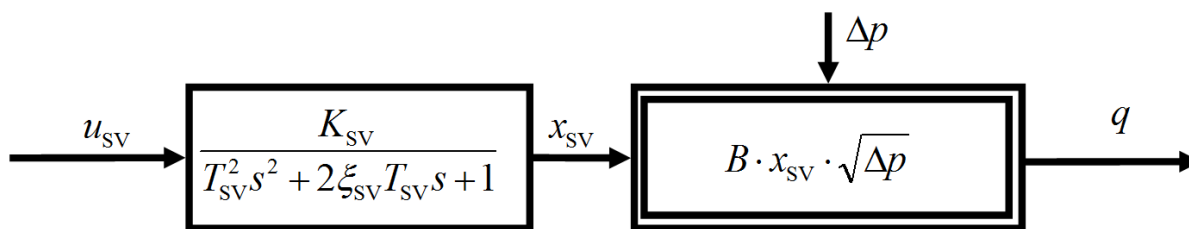
$$G_{sv}(s) = \frac{X_{sv}(s)}{U_{sv}(s)} = \frac{K_{sv}}{T_{sv}^2 s^2 + 2\xi_{sv} T_{sv} s + 1}. \quad (1)$$

Výstupem regulačního ventilu je průtok popsáný rovnicí

$$Q_i = B \cdot |x_{sv} \pm x_{sv0}| \cdot \sqrt{|\Delta p_i|}, \text{ pro } i=PA, PB, AT, BT, \quad (2)$$

kde  $B$  je průtokový součinitel,  $x_{sv}$  je poloha šoupátka škrticího ventilu,  $x_{sv0}$  je krytí škrticího ventilu,  $p_i$  je příslušný tlakový spád [NOSKIEVIČ, 1999].

Blokové schéma regulačního ventilu je na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2 Blokové schéma regulačního ventilu

Pokud je součinitel poměrného tlumení v přenosu (1) z intervalu  $\xi_{sv} \in \langle 0, 1 \rangle$ , jedná se o tzv. kmitavý člen, tzn., že na přechodové charakteristice bude překmit. Regulační ventily jsou však obecně dobře tlumené systémy (na rozdíl od hydromotoru). Jejich tlumení se většinou pohybuje v rozmezí  $\xi_{sv} \in \langle 0,8; 0,9 \rangle$ .

Dalším důležitým parametrem s ohledem na dynamické vlastnosti je vlastní frekvence regulačního ventilu. Jelikož je regulační ventil dynamický systém druhého řádu, má jeho logaritmická amplitudová frekvenční charakteristika (LAFCH) pro vyšší frekvence sklon  $-40 \text{ dB/dek}$  a vlastní frekvenci odečítáme při poklesu  $-6 \text{ dB}$  (což je maximální rozdíl mezi ideálním a skutečným průběhem LAFCH). LAFCH výrobce vždy udává, tudíž není problém tento parametr odečíst. Příklad odečtu vlastní frekvence na konkrétním regulačním ventilu je uveden v [SZYMECZEK, 2010] na straně 39.

### 2.3 Měření regulované veličiny

U hydraulických přímočarých pohonů je nejčastější regulovanou veličinou poloha. Regulovanou veličinou může u hydraulických pohonů být i rychlost nebo síla pohonu. Polohu můžeme měřit dvěma základními způsoby:

- Měření polohy přímo na hydraulickém pohonu.
- Měření polohy na technologickém zařízení, kterým hydraulický pohon pohybuje.

V prvním případě je snímač namontován přímo na nebo uvnitř hydraulického přímočarého motoru. Ve druhém případě snímač není namontován přímo na hydromotoru, ale na daném technologickém zařízení, kterým je pohybováno. Snímač v tomto případě nemusí měřit pohyb pístnice hydromotoru, ale pohyb daného zařízení, přičemž údaj o poloze hydromotoru je pak získán přepočtem z naměřené hodnoty (např. pokud hydromotor



pohybuje pákovým mechanismem, měřena je poloha koncového bodu mechanismu a pomocí převodových funkcí je vypočtena poloha pístnice hydromotoru).

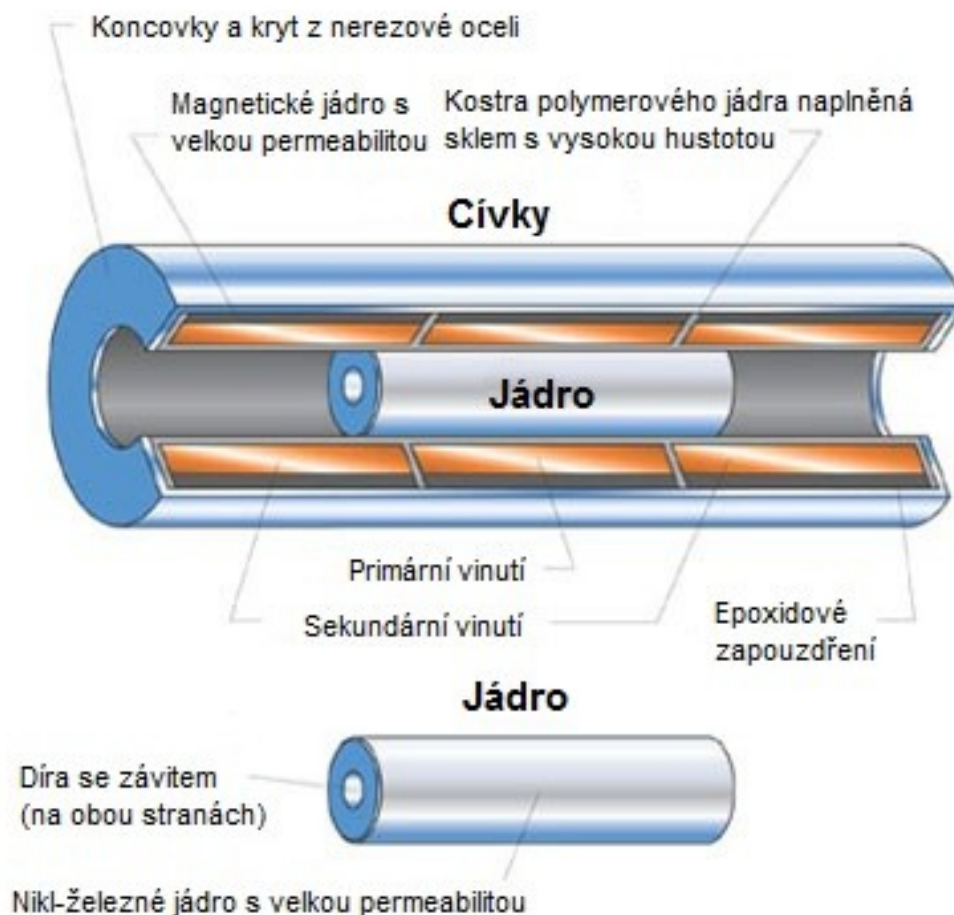
K měření polohy můžeme použít velké množství snímačů pracujících na mnoha principech:

- mechanické (nejčastěji tzv. koncové spínače),
- odporové (založeny na potenciometrech),
- magnetické (jazýčkové relé ovládané polem permanentního magnetu),
- indukční (změna vlastní nebo vzájemné indukčnosti),
- kapacitní (změna kapacity),
- lankové,
- transformátorové,
- optické,
- ultrazvukové,
- pneumatický převodník tryska-klapka.

Tyto principy jsou všeobecně známé a používané. Zaměřme se nyní na dva principy používané pro měření polohy hydraulického motoru, které jsou zabudovány přímo do motoru.

### **Transformátorové snímače**

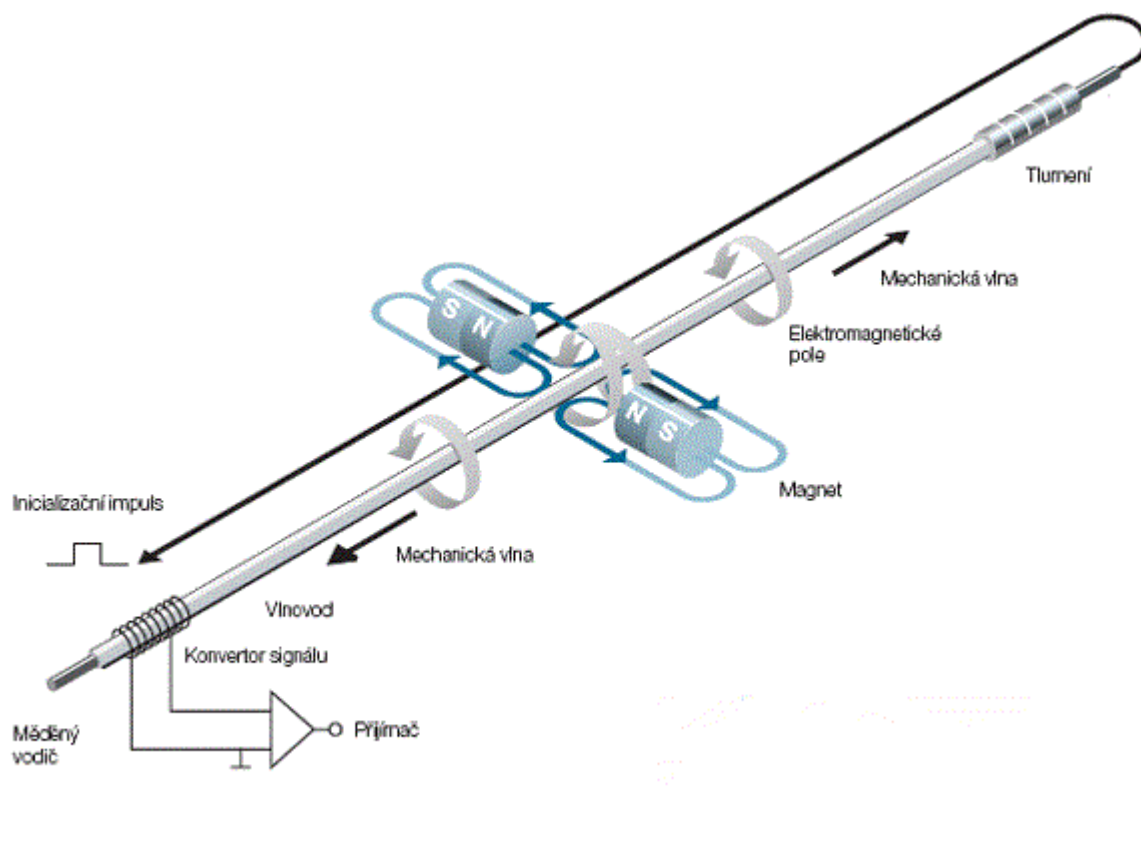
Tyto snímače pracují na principu změny magnetického toku (odporu) v lineárním transformátoru, jehož sekundární vinutí je složeno ze dvou do série zapojených cívek (ve vzájemné protifázi). Primární vinutí, které je umístěno mezi obě cívky sekundární, se napájí sinusovým signálem s konstantní frekvencí a amplitudou. Dále snímač obsahuje feromagnetické jádro (kotvu), které se pohybuje ve válci tvořeném výše popsány cívkami. Pokud je jádro uprostřed mezi sekundárními vinutími, indukované napětí je stejně velké a odečte se. Posune-li se jádro směrem k jedné nebo druhé sekundární cívkce, objeví se na výstupu rozdílové střídavé napětí, jehož amplituda odpovídá poloze jádra. Výstupní napětí sekundárních cívek je fázově posunuto o  $180^\circ$ , díky čemuž lze rozlišit i směr pohybu. Navíc z rychlosti změny amplitudy výstupního napětí můžeme určit rychlost pohybu jádra [VOJÁČEK, 2011]. Tyto snímače se často označují anglickou zkratkou LVDT, princip takového snímače je zobrazen na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3 Princip LVDT snímače [VOJÁČEK, 2011]

### Magnetostrikční snímače

Tyto snímače využívají tzv. magnetostrikční jev, tedy vznik elastické deformace v místě protnutí dvou magnetických polí. Tento snímač se skládá z dlouhého tenkého feromagnetického materiálu (označovaný jako vlnovod), permanentního magnetu a vyhodnocovací elektroniky. Jeden z výrobců těchto snímačů, firma Balluff, označuje tyto snímače obchodním názvem Micropulse, obrázek 2.4 [BALLUFF, 2011].



**Obrázek 2.4 Princip technologie Micropulse [BALLUFF, 2011] – magnetostrikční snímač**

Vlnovodem je protažen měděný vodič, kterým prochází proudové pulsy. Tento proud vytváří kolem vlnovodu kruhové magnetické pole. Druhé magnetické pole je vytvářeno permanentním magnetem a je kolmé na magnetické siločáry pole prvního. V místě, kde dojde k průtnutí obou polí, se vlivem magnetostrikčního jevu vytvoří malá elastická deformace (v řádu  $\mu\text{m}$ ), která se ve formě mechanické vlny šíří vlnovodem oběma směry. Důležitou vlastností snímače je známá a na vlivech okolního prostředí (teplota, rázy, vibrace, znečištění, apod.) téměř nezávislá rychlost šíření této mechanické vlny, tato rychlost je  $2830 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Na jedné straně snímače je mechanická vlna zatlumena, na druhé je změřena v konvertoru signálu doba, která uplynula od vyslání signálu k jeho přijetí. Konvertor signálu pracuje na principu obráceného magnetostrikčního jevu [BALLUFF, 2011].

U již zmiňovaného výrobce Balluff je možno objednat snímače s klasickým analogovým výstupem, nebo výstupem digitálním či SSI. Další možností je použít jednu z nabízených průmyslových sběrnic, a to CANopen, DeviceNet nebo PROFIBUS-DP. Nespornou výhodou při použití sběrnice je to, že lze ze snímače získat údaj o poloze a také o rychlosti. Použitím jednoho snímače tak lze nahradit dva klasické snímače.

### 3 Embedded řídicí systém

Řídicí systém, který označíme jako vestavný (anglicky *embedded*), je jednoúčelový systém, který je kompletně zabudován do zařízení či stroje, jenž řídí. Rozdíl mezi vestavěným řídicím systémem a osobním počítačem je v tom, že vestavěný řídicí systém je často jednoúčelový, vyrobený pro určitou konkrétní činnost, z čehož plyne možnost optimalizovat systém již při návrhu pro danou aplikaci. Touto optimalizací lze snížit cenu konečného produktu. Další úspor lze dosáhnout velkým počtem vyráběných kusů, jelikož vestavěné systémy se často vyrábějí sériově. Rozdíl mezi vestavěnými zařízeními a počítači pro osobní použití se dnes již značně rozplývá, jelikož jako vestavná zařízení jsou označovány i různé PDA, inteligentní mobilní telefony (smartphone) apod. Hardware těchto zařízení lze označit jako vestavěný, ovšem software je zde použit všeobecný, podobně jako v osobním počítači. [ARNOLD, 2000; LEWIN, 2003; VESTAVĚNÝ SYSTÉM, 2012].

#### 3.1 Použití *embedded* řídicích systémů

Vestavěné systémy se používají v téměř všech oblastech lidské působnosti. Lze je nalézt v těchto zařízeních [VESTAVĚNÝ SYSTÉM, 2012]:

- bankomaty,
- avionika (autopilot),
- mobilní telefony, PDA,
- řídicí jednotky spalovacích motorů,
- domácí automatizace (termostat, klimatizace, zavlažování),
- kalkulačky,
- vybavení domácnosti (mikrovlnná trouba, pračka, myčka),
- zdravotnické přístroje,
- herní konzole,
- počítačové periferie (tiskárny, modemy) apod.

Vestavěné řídicí systémy se samozřejmě používají i v průmyslových aplikacích, např. v [ARNOLD, 2000] jsou uvedeny tyto konkrétní aplikace:

- palivový řídicí systém, který monitoruje a řídí tok paliva do proudového motoru,
- inteligentní telefon přijímající rádiové signály z kouřových detektorů, snímačů pohybu, různých bezpečností snímačů, a předávající je centrální monitorovací stanici, která řeší případné mimořádné situace,
- stanovení přesné geografické polohy na Zemi měřením času mezi vysláním a přijetím rádiového signálu (ze satelitu),
- odbavovací systém sloužící k monitorování a kontrole vstupu, který je založen na paměťové kartě obsahující magnetický proužek,
- systém, který měří a kontroluje proces leptání, a zároveň odstraňuje nežádoucí části materiálu z povrchu integrovaného obvodu během výroby,
- systém řídicí vytápění a větrání vzduchu v budově (nebo více budovách) mající za úkol dosáhnout minimální spotřebu elektrické energie,
- pás měřící srdeční tep člověka, který signalizuje překročení bezpečného (předem zvoleného) limitu a pomocí rádiového signálu jej předává do mikrokontroléru.

Výše uvedený výčet jasně dokazuje, že použití vestavěných systémů je skutečně velmi široké a rozmanité.

## 4 Pásové pily na řezání kovu

V diplomové práci bude proveden konkrétní rozbor aplikace hydraulických pohonů a také návrh řídicího algoritmu. Aplikací, pro kterou bude návrh proveden, jsou pásové pily na řezání kovu. Jedná se o stroje využívající k činnosti hydraulické pohony. Nejčastěji se hydraulickým pohonem řídí posun pilového pásu do řezaného materiálu a přidržení (fixace) řezaného materiálu během řezného procesu. U komplexnějších (automatizovaných) pásových pil lze hydraulické pohony nalézt rovněž v zařízeních automatické manipulace s řezaným materiálem. Pásové pily se vyrábí ve dvou základních provedeních (lišících se vedením ramene, které umožňuje pohyb pilového pásu):

- s vertikálním vedením ramene,
- s otočným ramenem.

U pásových pil s otočným ramenem nemusí být použit rotační pohon. I u tohoto typu jsou použity lineární hydromotory a rotační pohyb ramene je zajištěn konstrukčním uspořádáním.

Místo pilového pásu lze na řezání materiálu použít i kotoučovou pilu. Touto konstrukcí se však tato práce zabývat nebude.

Pásovými pilami na řezání kovu lze dělit materiály kruhového, čtvercového i obdélníkového tvaru, a to jak materiály plné, tak i duté (trubky, profily apod.). Výrobou pásových pil na řezání kovu se zabývají např. firmy BOMAR, PMS, PILOUS, TMJ, STARRET, OPTIMUM QUANTUM, PROMA-PPK a další. U různých výrobců lze samozřejmě nalézt pásové pily různé ceny. Ta je závislá na stupni automatizace dané pily, dále pak na přesnosti, řezném rozsahu, velikosti řezaného materiálu a dalších parametrech. Pásové pily na řezání kovu lze rozdělit do tří základních skupin, u každé skupiny bude uveden jeden představitel a popsány jeho parametry.

### 4.1 Manuální

První skupinou jsou manuální pily na řezání kovu. Tyto malé, lehce přenositelné pily jsou určeny např. pro montážní a lehčí výrobu v dílnách. Posuv pilového pásu je zde zajištěn ručně (obsluhou), stejně jako zvedání ramene. Příkladem manuální pily na řezání kovu je výrobek firmy PILOUS s označením ARG 105 MOBIL, obrázek 4.1. Parametry

tohoto výrobku jsou shrnuty v tabulce 4.1. Ruční pásové pily na řezání kovu lze pořídit za cenu nepřekračující 20 000 Kč bez DPH.

**Tabulka 4.1 Parametry pásové pily na řezání kovu Pilous ARG 105 MOBIL [Pasove-pily.eu, 2008]**

<i>Parametr</i>	<i>Hodnota</i>
Rozměr pilového pásu	1385×13×0,65 mm
Řezná rychlost (pásu)	75 m·min <sup>-1</sup>
Maximální rozměry řezaného materiálu	105 mm (válec), 105×95 mm (obdélník)
Výkon motoru pily	0,55 kW
Rozměry	710×420×350 mm
Hmotnost	29 kg



**Obrázek 4.1 Pásová pila na řezání kovu Pilous ARG 105 MOBIL [Pasove-pily.eu, 2008]**

## 4.2 Poloautomatické

Poloautomatické pásové pily jsou již robustnější konstrukce, jsou odolné proti vibracím a pohyb pilového pásu je již automatický (pomocí hydraulického pohonu). Hydraulický pohon zde většinou slouží i k fixaci materiálu během řezání. Dále mohou být tyto pily vybaveny kartáčem na odstraňování pilin či jinou doplňkovou funkcí.

Za představitele byla vybrána pásová pila Ergonomic 320.250 GH od firmy Bomar. Zobrazena je na obrázku 4.2, její technické parametry jsou shrnuty v tabulce 4.2. Ceny pásových pil spadajících do této kategorie začínají zhruba na 30 000 Kč bez DPH, ovšem výjimkou nejsou ani ceny překračující 100 000 Kč bez DPH.



Obrázek 4.2 Pásová pila na řezání kovu Bomar Ergonomic 320.250 GH [Pasove-pily.eu, 2008]



**Tabulka 4.2 Parametry pásové pily na řezání kovu Bomar Ergonomic 320.250 GH [Pasove-pily.eu, 2008]**

<i>Parametr</i>	<i>Hodnota</i>
Rozměr pilového pásu	2910×27×0,90 mm
Řezná rychlost (pásu)	40÷80 m·min <sup>-1</sup>
Maximální rozměry řezaného materiálu	250 mm (válec), 290×240 mm (obdélník)
Výkon motoru pily	1,1/1,5 kW
Rozměry	1670×1166×1239 mm
Hmotnost	385 kg

### 4.3 Automatické

Automatické pásové pily na řezání kovu jsou schopny pracovat plně samostatně. Tyto CNC stroje jsou vybaveny podavači pro automatický pohyb materiálu, jejich konstrukce je velmi robustní a tím pádem odolná vůči vibracím. Podavače jsou nejčastěji řešeny jako válečkové tratě umožňující jednoduché podávání a bezpečnou manipulaci i s krátkými kusy materiálu. Jako představitel byl vybrán stroj opět od firmy Bomar, a to Ergonomic 290.250 DGA. Parametry této pily (obrázek 4.3) jsou zobrazeny v tabulce 4.3.

**Tabulka 4.3 Parametry pásové pily na řezání kovu Bomar Ergonomic 290.250 DGA [Pasove-pily.eu, 2008]**

<i>Parametr</i>	<i>Hodnota</i>
Rozměr pilového pásu	2910×27×0,90 mm
Řezná rychlost (pásu)	40÷80 m·min <sup>-1</sup>
Maximální rozměry řezaného materiálu	240 mm (válec), 220×300 mm (obdélník)
Výkon motoru pily	1,5/1,1 kW
Rozměry	2900×1850×1650 mm
Hmotnost	1500 kg



**Obrázek 4.3 Pásová pila na řezání kovu Bomar Ergonomic 290.250 DGA [Pasove-pily.eu, 2008]**

Automatické pásové pily na řezání kovu lze pořídit již od ceny blížící se 200 000 Kč bez DPH. Hlavním parametrem, který pak navyšuje cenu, je velikost řezaného materiálu. Pro materiály o průměru větším než 1 m se cena těchto automatů pohybuje kolem 2 500 000 Kč bez DPH (např. pila TMJ PP 1100).

Nutno podotknout, že na maximální velikost řezaného materiálu má vliv i úhel, pod kterým je skloněn pilový pás. U většiny pásových pil na řezání kovu lze měnit úhel sklonu řezného pilového pásu (označováno jako řezné rozsahy). Touto změnou úhlu řezu lze dosáhnout větší variability při řezání, co se týče tvaru řezaného materiálu, ovšem maximální velikost řezaného materiálu je pak menší.

Veškeré parametry, obrázky a ceny uvedených pásových pil na řezání kovu byly získány z internetového obchodu [Pasove-pily.eu, 2008] a jsou platné k 6. 4. 2012.

#### 4.4 Popis procesu řezání kovu

Řezání je definováno jako obrábění, při kterém dochází k odebrání částic materiálu, které mají tvar třísky, břitem řezného nástroje. Proces obrábění je taková technologie, při které vytváříme povrchy obrobku určitého tvaru, rozměrů a jakosti, a to odebráním částic materiálu pomocí mechanických, elektrických nebo chemických účinků, popř. jejich kombinacemi [BRYCHTA, 2007].

Z pohledu sestavení matematického modelu je podstatná výsledná řezná síla, kterou musíme vyvodit, abychom daný materiál mohli rozřezat. Ovšem analytický popis řezné síly není triviální, jedná se o nelineární vztah mnoha parametrů, které navíc nejsou konstantní. Řeznou sílu lze popsat vztahem

$$F_R = C \cdot b \cdot t^y \cdot k, \quad (3)$$

kde  $C$  je konstanta,  $b$  je šířka řezu,  $t$  je hloubka řezu,  $k$  je počet zubů v záběru a  $y$  je exponent. Exponent  $y$  je závislý na šířce i hloubce řezu, řezné rychlosti, vlastnostech materiálu, míře otupení pásu, materiálu nástroje a také na vzájemné kombinaci těchto parametrů [FMV-DESIGN, 2012].

Pro potřeby HiL simulace bylo potřeba zavést určité zjednodušení, které by dostatečně přesně popisovalo typ řízené soustavy. Díky tomu jsme schopni navrhnout potřebný typ řídicího algoritmu. Zjednodušení bylo docíleno výpočtem řezné rychlosti na základě pouze dvou parametrů, a to řezné síly  $F_R$  a počtu zubů v záběru  $k$ . V závislosti na těchto dvou parametrech je z tabulky vybírána výsledná řezná rychlost  $v_R$ . Integrací této rychlosti se získá poloha zubů pilového pásu. Pokud od této hodnoty odečteme polohu pístnice, která odpovídá poloze ramene pásové pily, v kterém obíhá pilový pás, získáme stlačení pilového pásu. Pilový pás je tedy modelován tuhostí pružiny, tato vlastnost dostatečně popisuje chování pásu. Vlastnosti pásové pily lze tedy popsat pohybovou rovnicí

$$m \cdot a = F_G + F_H - F_R, \quad (4)$$

kde  $m$  je hmotnost ramene s pilovým pásem,  $a$  je zrychlení hydromotoru, který je součástí mechanismu přtlaku,  $F_G$  je tíhová síla ramene,  $F_H$  je hydraulická síla (síla daná rozdílem tlaků v komorách hydromotoru působících na plochy pístu),  $F_R$  je řezná síla. Po dosazení do rovnice (4) dostaneme

$$m \cdot a = m \cdot g + (S_A p_A - S_B p_B) - k_P \cdot (x - y), \quad (5)$$

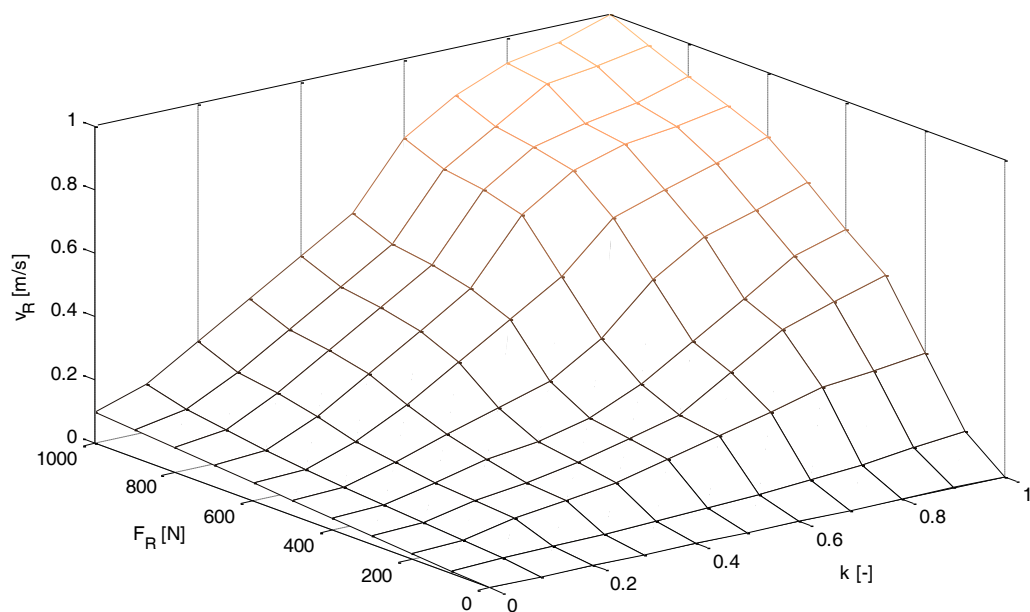
kde  $x$  je poloha pístnice hydromotoru,  $y$  je poloha zubu pilového pásu.

Precizování popisu řezání by si vyžadovalo upřesnění všech potřebných parametrů. Popis řezné síly by se musel provést pro konkrétní stroj, typ, rozměry a řezaného materiálu, vlastnosti použitého pilového pásu apod. Významnou pomocí by bylo naměření dat na reálné pásové pile.

Pro účely návrhu řídicího algoritmu je podstatné získat závislost síly na měřitelných parametrech. Z dostupných údajů byla tato závislost modelována pomocí dvourozměrné funkce

$$v_R = f(F_R, k), \quad (6)$$

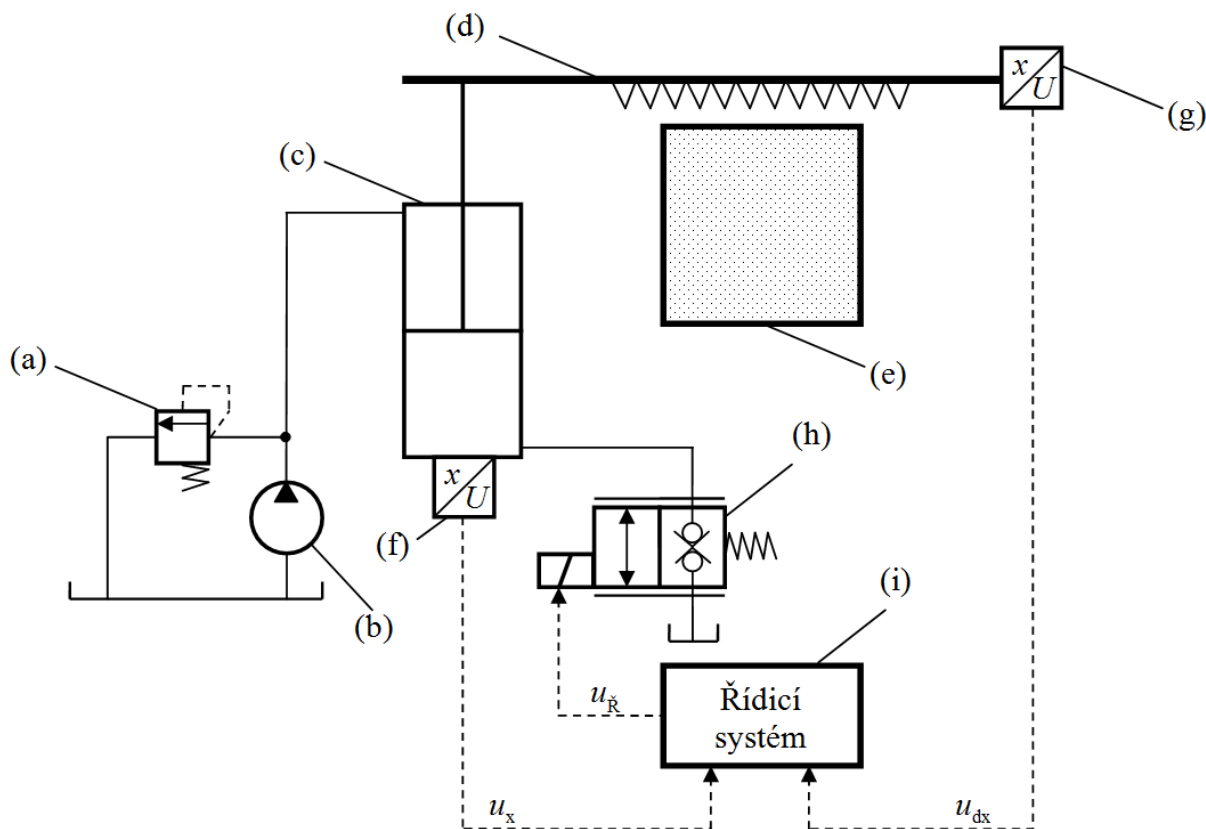
kde počet zubů  $k$  je zadáván bezrozměrně. Závislost (6) je zobrazena na obrázku 4.4.



**Obrázek 4.4** Vykreslení závislosti řezné rychlosti na řezné síle a poměrném počtu zubů v záběru modelované pomocí tabulky

## 5 Hydraulický pohon pásových pil na řezání kovu

Pásové pily využívají hydraulické pohony pro různé činnosti. K samotnému řízení řezné rychlosti bývá velmi často využíván proporcionální škrtkací ventil. Schéma hydraulického obvodu pásové pily pro fázi řezání je zobrazeno na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1 Schéma prvků pásové pily

Pásová pila je vybavena snímačem polohy (f) a také snímačem stlačení (g) pilového pásu vedeného v rameni (d). Jedna komora hydromotoru (c) je předeprnuta na konstantní tlak, který zajišťuje hydrogenerátor (b) a pojistný ventil (a). Průtok kapaliny z druhé komory je řízen proporcionálním ventilem (h) ovládaným napětím ( $0 \div 5$  V nebo  $0 \div 10$  V). Řídicí systém (i) na základě údajů ze snímačů (signály  $u_x$  o poloze pístnice a  $u_{dx}$  o stlačení pilového pásu) vypočítává akční zásah, kterým je napětí na škrtkací proporcionální ventil  $u_R$ . Na základě řídicího algoritmu je řízena rychlost řezání materiálu (e).

## 5.1 Model hydraulického pohonu

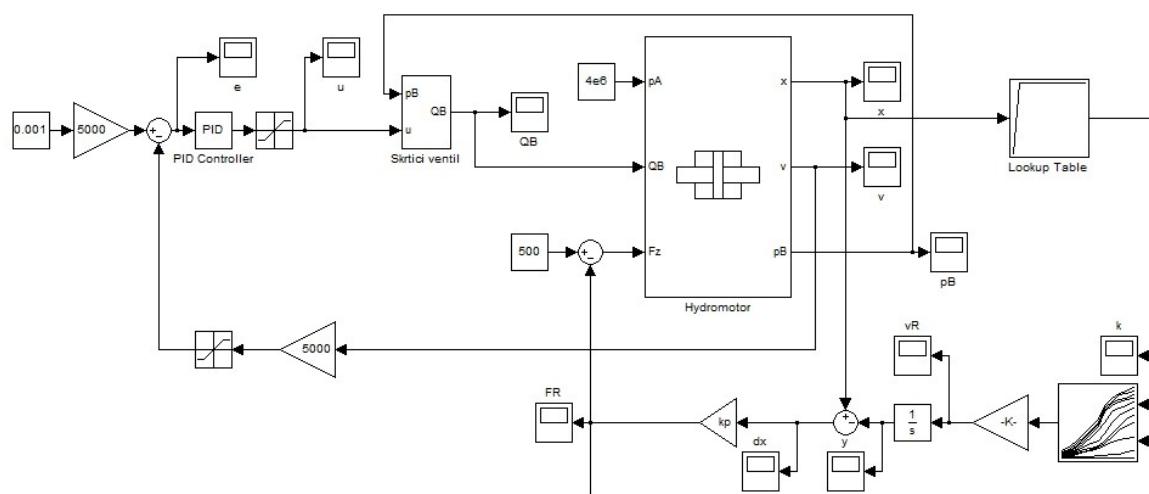
Pro vytvoření modelu hydraulického pohonu bude použit model hydromotoru popsáný v [NOSKIEVIČ, 1999]. Proporcionální škrticí ventil je popsán pomocí škrcení průtoku přes hranu rovnicí

$$Q = B \cdot (x_{SV} + x_{SV0}) \cdot \sqrt{p_B} \quad (7)$$

Odvození rovnice (7) popsáno rovněž v [NOSKIEVIČ, 1999]. Dynamické vlastnosti škrticího ventilu budou popsány přenosem proporcionálního členu se setrvačností druhého řádu

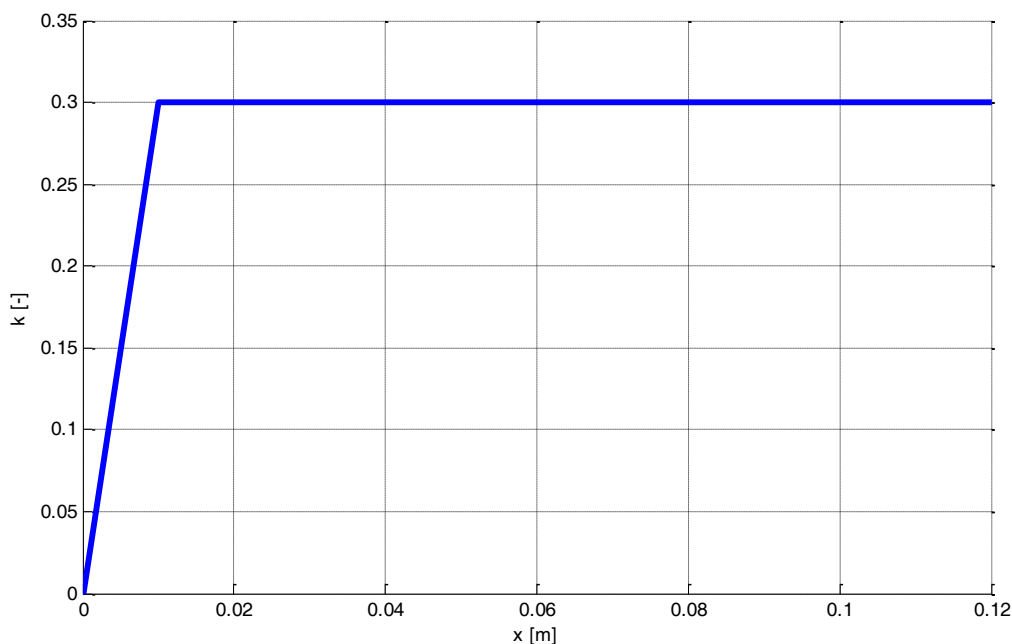
$$G_{SV}(s) = \frac{K_{SV}}{T_{SV}^2 s^2 + 2\xi_{SV} T_{SV} s + 1} \quad (8)$$

Výsledný matematický model pásové pily sestavený v prostředí SIMULINK, v kterém je řezná rychlost vybírána z tabulky na základě řezné síly a počtu zubů v záběru, je zobrazen na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2 Model pásové pily

Poměrný počet zubů v záběru se mění v závislosti na poloze pístnice hydromotoru a profilu řezaného materiálu. Pro účely simulace byl počet zubů modelován funkcí zobrazenou na obrázku 5.3. Vstupem této funkce (osa x) je poloha hydromotoru (0,12 m je maximální zdvih) a výstupem (osa y) je poměrný počet zubů odpovídající materiálu s konstantním průřezem. Prakticky byla tato funkce modelována pomocí tabulky Look-up table.



Obrázek 5.3 Funkce modelující poměrný počet zubů v záběru

Model zobrazený na obrázku 5.2 bude použit pro účely HiL simulace, jeho úprava je popsána v následující kapitole. Průběhy z HiL simulace jsou zobrazeny v kapitole 8.

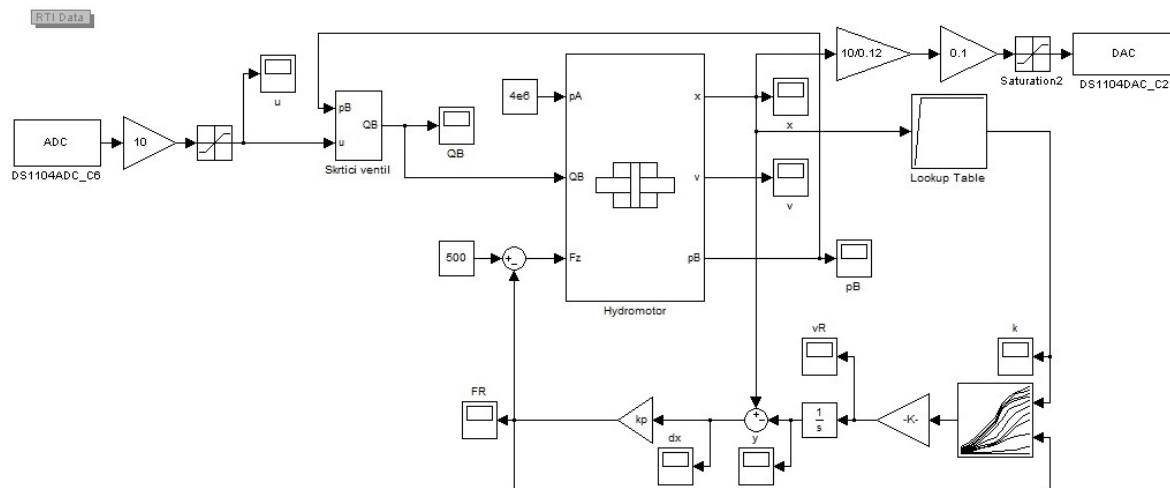
## 5.2 Úprava modelu pro HiL simulaci

Pro Hardware in the Loop (dále jen HiL) simulaci bude použita zásuvná řídicí karta do stolního počítače dSPACE DS1104. Tato karta je určena pro výzkum a vývoj. Do stolního PC ji lze zakomponovat pomocí sběrnice PCI, základní popis uveden v [DSPACE, 2011]. Rozhraní reálného času umožňuje snadné použití vstupně/výstupních bloků v prostředí Simulink. V tomto prostředí je vytvořen matematický model řízené soustavy, který je zkompilován, nahrán na kartu a zde je i spuštěn.

Do modelu jsou tedy přidány bloky ADC (vstupy) a DAC (výstupy). Pro správnou funkci je nutné mít nainstalován toolbox Real-Time Workshop a provést tato nastavení:

- dobu simulace nastavit na nekonečno (inf),
- menu *Simulation* → *Configuration Parameters...* → *Optimization* → zvolit položku *Block reduction*,
- menu *Simulation* → *Configuration Parameters...* → *Real - Time Workshop* → v položce *System target file* zvolit *rti1104.tlc*.

Na obrázku 5.4 je zobrazeno výsledné schéma, které je doplněno o vstupně/výstupní bloky, které umožní zavést do modelu akční veličinu (výstupní veličina z řídicího systému) a zároveň umožní skutečnou (regulovanou) veličinu přivést do řídicího systému (vstupní veličina řídicího systému).

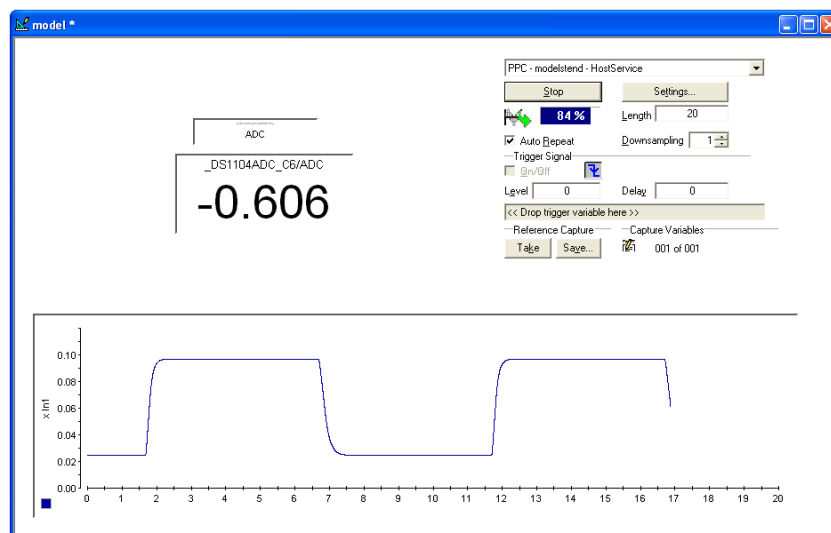


**Obrázek 5.4 Simulační schéma pásové pily na řezání kovu upravené pro HiL simulaci**

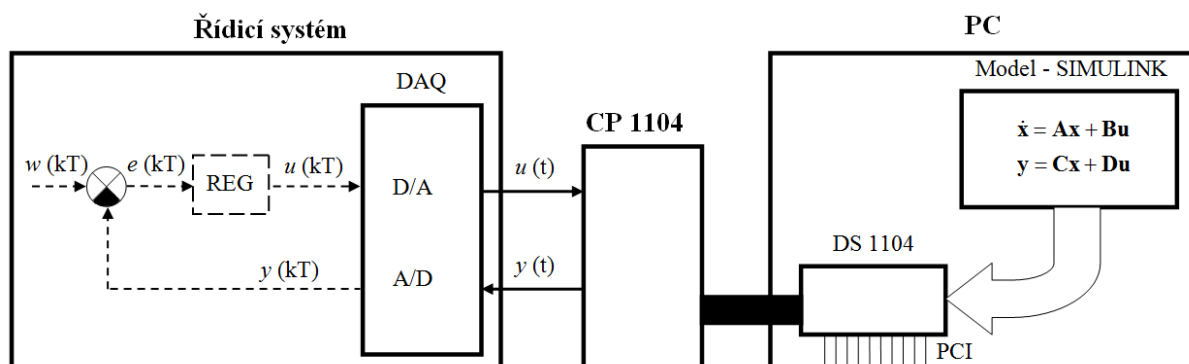
Stisknutím tlačítka pro překlad (Incremental Build) je model nahrán na kartu. V programu Control Desk můžeme zobrazit všechny proměnné z modelu, ukládat je a provádět také další operace, viz stránky výrobce [DSPACE, 2012]. Vytvořené prostředí pro zobrazování veličin je zobrazeno na obrázku 5.5. Ve spodní části je průběžný graf zobrazující polohu pístnice hydromotoru. V levé části obrázku je normované aktuální napětí na AD převodníku. V pravé části obrázku 5.5 se nachází objekt, v kterém lze definovat vlastnosti obrázku (*Capture Settings*), a také aktuální průběh ukládat (buď stiskem tlačítka uložit – Save..., nebo nastavením spouštěcí úrovně – *trigger*).

Měřicí karta je propojena s konektorovým panelem dSPACE CP1104, na němž jsou pomocí koaxiálních konektorů vyvedeny všechny vstupy a výstupy. K tomuto panelu tedy připojíme vstupy a výstupy z řídicího systému tak, jak je zobrazeno na obrázku 5.6.





Obrázek 5.5 Prostředí v programu Control Desk pro zobrazování dat z HiL simulace v reálném čase



Obrázek 5.6 Blokové schéma simulace Hardware in the Loop

Panel dSPACE CP1104 je zobrazen na obrázku 5.7. Na tento panel lze připojit 8 analogových vstupů a výstupů, digitální vstupy a výstupy, inkrementální snímače, sériovou linku (RS232 a RS485). Funkčnost jednotlivých vstupů a výstupů je signalizována LED diodami.



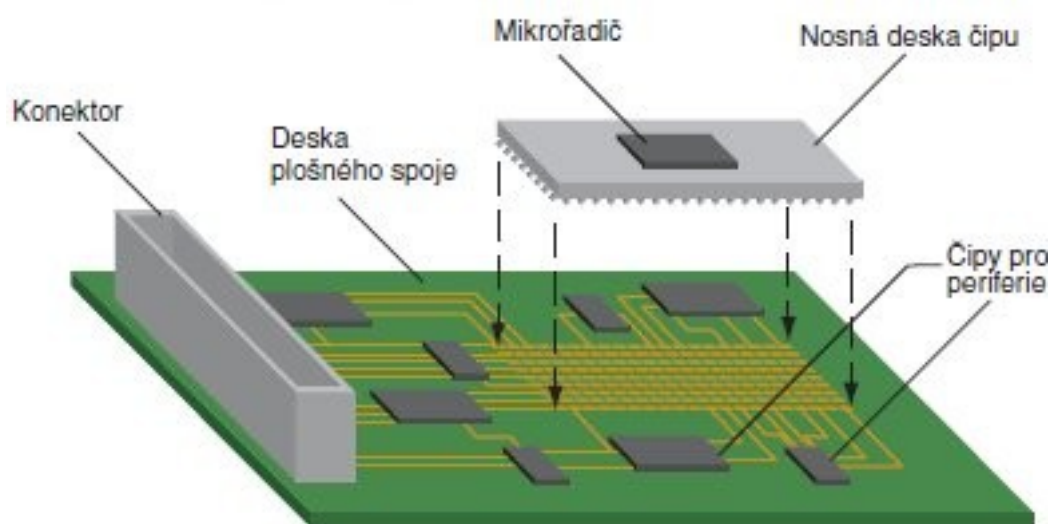
Obrázek 5.7 Konektorová deska dSPACE CP1104 s připojenými vodiči a kabelem vedoucím ke kartě DS1104

## 6 Návrh řídicího systému

Řídicí systémy můžeme obecně rozdělit do dvou skupin, a to na řídicí systémy založené na bázi osobního počítače (PC) a na řídicí systémy založené na programovatelných automatech (PLC). Vestavěné řídicí systémy lze většinou zařadit do kategorie řídicích systémů založených na bázi PC, přičemž jejich řídicím prvkem často bývá jednodeskový mikropočítač. Takovéto řídicí systémy jsou v [MASI, 2008] označeny jako SBC (Single-Board Computer). Autor zmíněného článku uvádí tyto vlastnosti řídicích systémů postavených na jednodeskovém mikropočítači (SBC):

- Velký výpočetní výkon (výkon procesorů P4 až dvou-jádrové či čtyř-jádrové procesory).
- Možnosti rozšíření (až 20 PCI slotů).
- Relativně nízké náklady (v praxi ověřené řešení se standardizovanými platformami, možnost výběr z klasických OS, software i hardware jsou široce dostupné).

SBC je kompletní počítač postavený na jedné desce plošného spoje, který obsahuje mikroprocesor, paměti, vstupní a výstupní obvody (I/O) a další vybavení potřebné pro funkční počítač [SIGNLE-BOARD COMPUTER, 2012]. Architektura takového řídicího systému je zobrazena na obrázku 6.1.

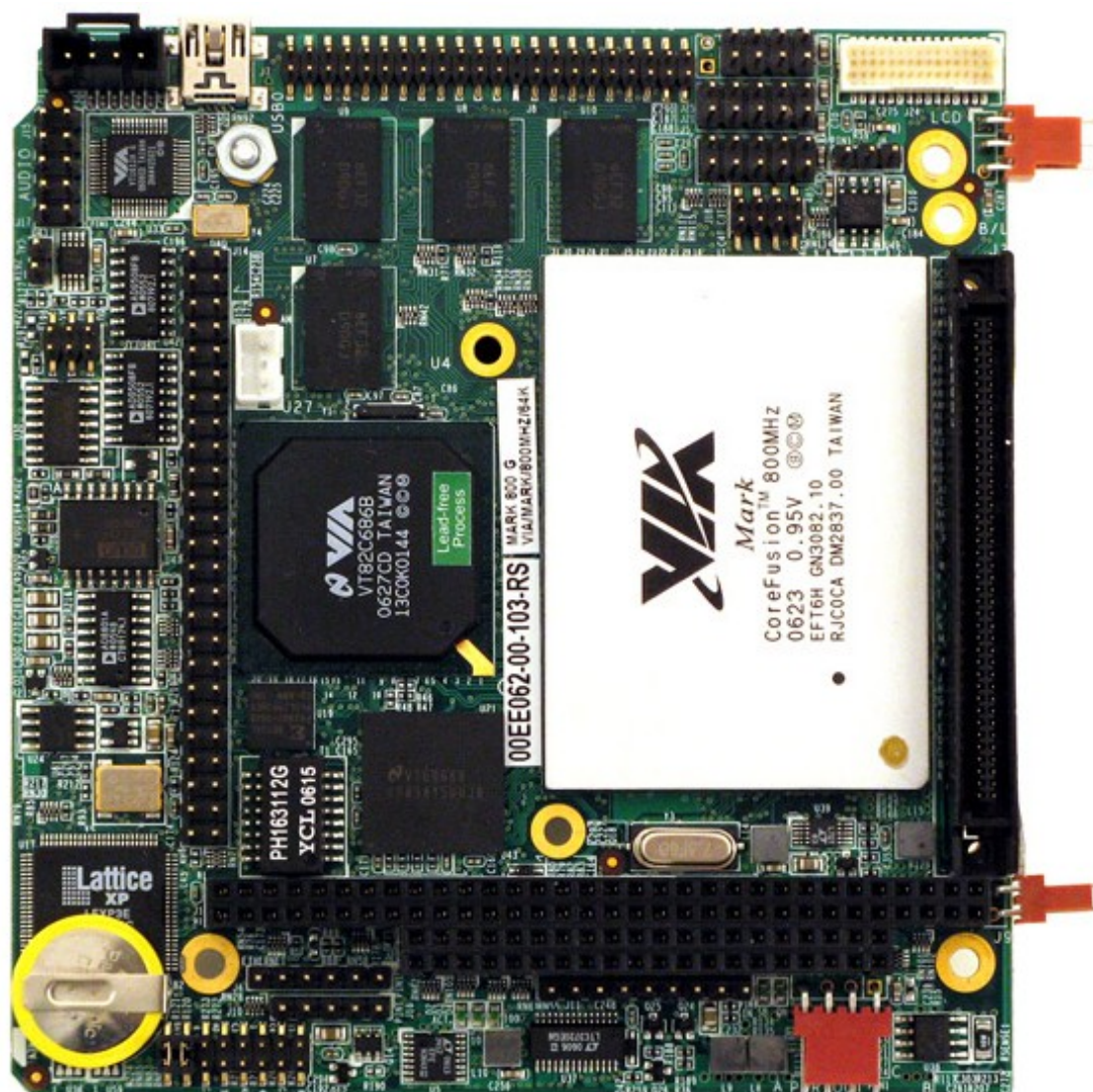


Zdroj: Control Engineering

Obrázek 6.1 Architektura řídicího systému založeného na bázi jednodeskového mikropočítače (SBC) [MASI, 2008]

Tato architektura řídicího systému byla vybrána jako vhodná pro realizaci vestavěného (embedded) řídicího systému pro hydraulické pohony, jelikož splňuje všechny nároky popsané v této práci.

Po zvážení všech požadavků byl vybrán řídicí systém Athena II SBC od firmy Diamond Systems [ATHENA II SBC, 2012]. Athena II SBC obsahuje kombinovaný nízko výkonový a vysoce integrovaný VIA Mark procesor s pamětí přímo na čipu, integrovaný obvod pro sběr dat (16 b), vestavěnou 256MB paměť RAM, AC97 audio konektor, 4 USB porty, 4 sériové porty (RS232) a další periférie. Řídicí systém Athena II SBC je postaven na architektuře PC/104, má rozměry 106 x 144 mm, rozšířený teplotní rozsah, tyto vlastnosti z něj dělají kompletní embedded systém pro náročné aplikace. Na obrázku 6.2 je zobrazen řídicí systém Athena, výběr jeho vlastností je v tabulce 6.1.

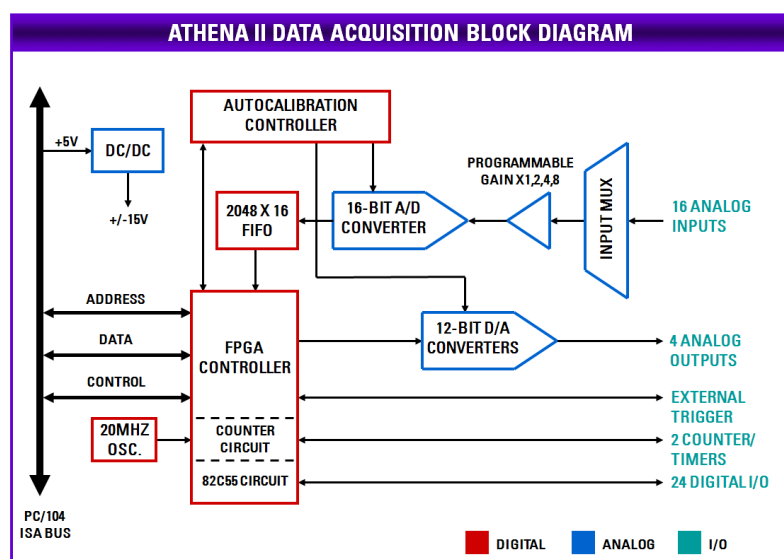


**Obrázek 6.2 Řídicí systém Athena II SBC [ATHENA II SBC, 2012]**

Tabulka 6.1 Vybrané vlastnosti řídicího systému Athena II SBC

Procesor	VIA Mark, nízko-výkonový Pentium III
Frekvence	500 MHz nebo 800 MHz
Spotřeba	10 W
Paměť	256 MB
Ethernet	10/100 Mbps
Sériové rozhraní	4x RS-232
Paralelní rozhraní	SPP, EPP
USB rozhraní	4x, verze 1.1
Analogové vstupy	16x unipolární (single-ended) / 8x bipolární (differential)
A/D převodník	16 b, max. 100 kHz
Vstupní rozsahy	$\pm 10V$ , $\pm 5V$ , $\pm 2,5V$ , $\pm 1,25V$ , $0 \div 10V$ , $0 \div 5V$ , $0 \div 2,5V$ , $0 \div 1,25V$
Analogové výstupy	4x, 12b D/A převodník
Výstupní rozsahy	$\pm 10V$ , $\pm 5V$ , $0 \div 10V$ , $0 \div 5V$
Vstupní impedance	$10^{13} \Omega$
Digitální I/O	24 digitálních vstupů/výstupů, 2 čítače/časovače
Napájení	+5VDC $\pm 5\%$ , 2A
MTBF	>165705 h
Podporované OS	Linux, Windows XP, Windows Embedded Standard, QNX, DOS

Z pohledu řízení je podstatný integrovaný obvod pro zpracování dat, jehož nejvýznamnějšími částmi jsou A/D převodník (16 b, vzorkovací frekvence 100 kHz) a D/A (12 b). Dále tento obvod obsahuje 24 programovatelných digitálních vstupů/výstupů. Blokový diagram obvodu pro zpracování dat je zobrazen na obrázku 6.3.



Obrázek 6.3 Blokový diagram obvodu pro zpracování dat řídicího systému Athena II SBC [ATHENA II SBC, 2012]

## 6.1 Tvorba obrazu operačního systému pro řídicí systém

Řídicí systému používá operační systém (dále jen OS) Microsoft Windows XP Embedded. Základní informace o tomto OS lze nalézt na českých stránkách [MICROSOFT WINDOWS EMBEDDED, 2011], podrobnější pak na anglických stránkách [WHAT IS WINDOWS EMBEDDED?, 2012] výrobce. Vlastnosti a výhody, pro které je tento OS vhodný k řízení jsou shrnuty v článku [BEDNÁŘ, 2002]. Shrňme nyní vlastnosti OS Windows Embedded. Jedná se o OS určené pro specializovaná zařízení či zařízení jednoúčelová. Za jednu z největších výhod se považuje 100% kompatibilita se všemi aplikacemi a ovladači Windows. Komponenty tohoto OS zcela vycházejí z klasických Windows, což umožňuje použít pro vývoj řídicích algoritmů libovolný dostupný programovací nástroj. Všechny komponenty jsou navíc určeny pro běh na „malém“ systému s polovodičovým diskem [BEDNÁŘ, 2002], což je jistě další nesporná výhoda pro embedded aplikace.

Rozdíl mezi Windows XP Embedded a systémem Windows pro stolní PC je i v instalaci. Místo instalace je nutno vytvořit obraz OS pro cílové zařízení, který poté na toto zařízení nahrajeme [BEDNÁŘ, 2002]. Postup pro popisovaný řídicí systém Athena II je popsán ve výrobcem dodávaném dokumentu [SHAH, 2009]. V rámci diplomové práce byly vytvořeny obrazy pro Flash disky firmy Diamond o kapacitách 4 GB, 1 GB a 0,5 GB.

### Tvorba obrazu OS pro řídicí systém Athena II SBC

- 1) Na vývojový počítač (ne na řídicí systém Athena II SBC) nainstalujeme nástroje Microsoft Windows XP embedded. V tomto nástroji postupně nainstalujeme všechny části (Tools Setup, Database Engine Setup, Database Setup). Může nastat problém s chybějícími komponentami Windows, tyto problémy je nutno řešit individuálně a chybějící komponenty (programy) doinstalovat.
- 2) Spustíme program Component Designer. Z menu *File* vybereme *Import* a načteme soubor `devices_athenaII.pmq` dodávaný výrobcem (tento soubor je umístěn na příloženém DVD ve složce \TvorbaOS).
- 3) Stiskneme tlačítko *Start*, vyčkáme na načtení souboru do programu.
- 4) Po vypsání hlášky o dokončení načítání (*Import Session completed successfully*) stiskneme tlačítko zavřít (*Close*) a načtený soubor se nám objeví v programu.



- 5) Pomocí rozbalovacího tlačítka + se dostaneme do položky Windows XP embedded *Client - Components*, na tuto klikneme pravým tlačítkem a vybereme položku *Release*.
- 6) Vytvořený soubor s příponou sld uložíme volbou *Save* z menu *File*.
- 7) Spustíme Component Database Manager. V okně, které se nám zobrazí, zvolíme záložku *Database* a poté klikneme na tlačítko *Import....* V dialogovém okně načteme vytvořený soubor s koncovkou sld, otevřeme jej stiskem tlačítka *Open* a načtení dokončíme stiskem tlačítka *Import*.
- 8) Databáze komponent je načtena a nyní můžeme zavřít všechny doposud použité programy. Spustíme program Target Designer. Vytvoříme novou konfiguraci vytvářeného operačního systému výběrem *New* v menu *File*.
- 9) Vytvářenou konfiguraci vhodně pojmenujeme a stiskneme *OK*. Z okna Component Browser poté přetáhneme položku *devices\_athenaII* do námi vytvářeného projektu.
- 10) Ve vyhledávacím okně napíšeme do políčka hledat (*Search*) název *Explorer Shell* (cestu k tomuto souboru i všem následujícím lze nalézt v dokumentu [SHAH, 2009]) a stiskneme ikonu pro vyhledávání. Nalezenou komponentu přetáhneme do vytvářeného projektu stejně jako předtím *devices\_athenaII*.
- 11) Stejným způsobem přidáme do projektu i následující komponenty: *FAT, NTFS, NT Loader, FAT Format, NTFS Format, English Language Support, Automatic Logon, Windows Logon (Standard), Display Control Pane, Device Manager, Accessories/Communication programs, Standard Start Menu Shortcuts, User Interface Core, Windows Firewall Control Panel, IIS FTP server, Microsoft-windows-HTTP, Task Manager, Registry Editor, Images and Media, TCP/IP Utilities, Windows Accessories, Accessories/System Tools, Power management Application, Terminal Server Client*.
- 12) Rozbalíme komponentu *Automatic Logon* v konfiguračním prohlížeči a vybereme položku nastavení (*Settings*). Vypíšeme uživatelské jméno (*User name*), např. *Administrator* a příp. vyplníme i heslo.
- 13) Rozbalíme komponentu *Windows Logon (Standard)* a opět vybereme vlastnosti (*Settings*). Odškrtneme položky *Show friendly winlogon* a *Welcome to windows screen before logon*.
- 14) Rozbalíme komponentu *Standard Start Menu Shortcuts* a vybereme prostředky (*Resources*, pro jejich zobrazení musí v menu *View* mít tyto vybrány). Nyní odebereme komponenty umístěné v menu *Start*, které nebudeme potřebovat: *Windows Messenger.Ink, Windows Movie Maker.Ink, Accessibility Wizard.Ink,*

Net Meeting.Ink, Activate Windows.Ink, Disk Cleanup.Ink, Disk Defragmenter.Ink, Files and Settings.Ink, Files and Settings Transfer Wizard.Ink, Freecell.Ink, Hearts.Ink, Internet Backgammon.Ink, Internet Checkers.Ink, Internet Hearts.Ink, Internet Reversi.Ink, Internet Spades.Ink, Minesweeper.Ink, Pinball.Ink, Solitaire.Ink, Spider Solitaire.Ink, Remote Assistance.Ink, Imaging.Ink (z důvodu úspory místa není vypisována celá cesta k jednotlivým položkám, ale pouze jejich název).

- 15) Rozbalíme komponentu *User Interface Core* a zvolíme vlastnosti (*Settings*). Postupně zaškrtneme tyto vlastnosti: *Show My Computer on Start Menu*, *Show Desktop icons*, *Show Help and Support on Start Menu*, *Show Control Panel on Start Menu*, *Show Network Connections on Start Menu*, *Show Search on Start Menu*, *Show Run on Start Menu*, *Show Internet Explorer on Start Menu*, *Show All Programs list on Start Menu*, *Show context menu on shell folders*, *Show context menu on task bar*, *Show notifications on task bar*. Položky, které již byly vybrány, ponecháme zaškrtnuty.
- 16) Úplně nahoře v konfiguračním prohlížeči vybereme u jména vytvářeného nastavení (to, které jsme zadali při vytváření nové konfigurace) vlastnosti (*Settings*). V tomto nastavení je možno zadat licenční klíč, měnit pojmenování systémových složek, a také měnit velikost zaváděcího oddílu (*Boot partition size*, většinou zadáváme velikost stejnou jakou má disk).
- 17) Z menu konfigurace (*Configuration*) vybereme volbu ověření závislostí (*Check Dependencies*). Počkáme na dokončení vykonávání, okno zavřeme tlačítkem *Close*. Nyní musíme vyřešit všechny úkoly, které se zobrazí v okně *Tasks*.
- 18) Z menu konfigurace (*Configuration*) vybereme volbu sestavení cílového obrazu (*Build Target Image*) a umístění, kam chceme vytvořený obraz uložit, před vypnutím programu vytvořený projekt uložíme (*File - Save*).
- 19) Posledním krokem nutným ke správné činnosti je nakopírování souborů *wdreg.exe*, *windrvr.sys* a *dscudkp.sys* (na DVD umístěny ve složce \ObrazyOS) do složky *Windows\system32\drivers* v našem vytvořeném obrazu operačního systému.

Pozn.: Všechna výše popsaná nastavení jsou doporučena výrobcem. Po jejich provedení má Windows vzhled, na jaký jsme zvyklí. Ovšem konkrétní konfigurace a přidání komponent, včetně nastavení jejich vlastností je na uživateli, který výše uvedený postup nemusí dodržovat a může si operační systém vytvořit tak, jak sám potřebuje. Počítač musí být během vytváření kvůli načítání databází připojen k internetu.

## 6.2 Nahrání operačního systému na Flash disk

Velmi důležité je nahrát vytvořený obraz OS (*image*) do zaváděcího (*boot*) sektoru na disku. Tento postup je popsán v níže uvedených čtrnácti bodech (disk musí být připojen k PC přes IDE rozhraní) s použitím Linux OS s názvem Gnome Partition Editor (GParted Live). Jedná se o OS s licenci GNU, více na stránkách [GPARTED, 2012].

### Postup při vytváření obrazu operačního systému:

- 1) Z výše uvedených stránek stáhneme obraz OS, který vypálíme na CD.
- 2) CD s OS GPartEd Live vložíme do CD-ROM mechaniky a restartujeme počítač.
- 3) V OS se dostaneme do příkazového řádku.
- 4) Nastavíme správný počet cylindrů, hlav a sektorů na disku. Např. pro 4GB Solid State Flashdisk výrobce Diamond Systems je to C=7937, H=16, S=63 (pro 1GB disk stejného výrobce pak C=1986, H=16, S=63). Toto nastavení provedeme zapsáním příkazu: `fdisk -C 7937 -H 16 -S 63 /dev/sda`.
- 5) Spustíme zjednodušené menu pro příkaz fdisk, a to zapsáním: `fdisk /dev/sda`.
- 6) Stiskem tlačítka „d“ smažeme všechny případné sektory na disku.
- 7) Stiskem tlačítka „n“ vytvoříme primární diskový oddíl, poté, co nás příkaz vyzve k zadání velikosti počátku a konce oddílu, stiskneme 2x Enter (pro vytvoření maximální velikosti oddílu).
- 8) Tento primární diskový oddíl nastavíme jako zaváděcí (*boot*) stiskem klávesy „a“, poté se nás OS zeptá na číslo sektoru, který chceme nastavit jako zaváděcí, stiskneme tedy „1“, jelikož máme jen jeden sektor (má číslo 1).
- 9) Vytvořenému zaváděcímu oddílu přiřadíme souborový systém, a to stisknutím tlačítka „t“, poté stiskneme tlačítko „7“ (pro výběr souborového systému HPFS/NTFS/exFAT).
- 10) Stiskneme tlačítko „p“, kde zkontrolujeme správný počet C/H/S, nastavení primárního sektoru jako zaváděcího (musí u něj být \*) a správný souborový systém (HPFS/NTFS/exFAT).
- 11) Provedené změny uložíme stiskem klávesy „w“.
- 12) Spustíme OS nainstalovaný na daném PC, a na disk (v některých případech je třeba jej naformátovat) nakopírujeme vytvořený image OS.
- 13) Flashdisk připojíme k řídicímu systému Athena, Flashdisk musí být nastaven jako *master* (při připojení k PC s CD-ROM jako *slave*) pomocí propojky (*jumper*).
- 14) Při prvním spuštění se automaticky spustí tzv. First Boot Agent, který systém zkontroluje a připraví pro běžný provoz.



### **6.3 Servisní přístup k řídicímu systému**

Po odladění funkčnosti řídicího systému se předpokládá jeho autonomní činnost, tedy bez jakýchkoli zásahů obsluhy. Ovšem v některých případech je potřeba řídicí systém nastavovat, nebo opravovat chyby, které se objeví až za běhu řídicího systému. K těmto účelům lze využít více způsobů. K řídicímu systému byl použit přístup pomocí vzdálené plochy (anglicky *Remote Desktop Protocol* – RDP). Jedná se o síťový protokol umožňující ovládat vzdálený počítač. Připojení pracuje na principu client-server.

Na řídicím systému Athena II SBC je nainstalován operační systém Windows XP embedded, který funkci vzdálené plochy podporuje. Na servisním počítači pak musí být operační systém podporující protokol RDP (obsahují jej OS Windows, Mac X a další). Pomocí protokolu vzdálené plochy se připojuje k určitému účtu definovanému v operačním systému řídicího systému Athena II SBC. Tímto způsobem lze tedy vyřešit i tzv. přístupová práva, a to tak, že se u jednotlivých účtů definují možnosti konfigurace. Jelikož musí být každý uživatelský účet použitý pro protokol vzdálené plochy chráněn heslem, je zabráněno i neoprávněnému přístupu.

Přístup k řídicímu systému Athena II SBC pomocí protokolu vzdálené plochy byl vyzkoušen na PC s operačním systémem Windows XP Service Pack 3.

## **6.4 Komunikace s nadřazeným řídicím systémem**

U řídicího systému pásových pil na řezání kovu se předpokládá samostatná činnost (autonomní). Význam samostatné činnosti lze chápat tak, že po zapnutí řídicího systému jsou veškeré akce spojené s činností pásové pily vykonávány bez zásahu obsluhy. Chod řídicího systému je řízen pouze signály z koncových spínačů popř. jiných snímačů i spojitých, například najetí materiálu do požadované polohy zaznamenávané snímačem polohy.

Je zřejmé, že i v těchto okamžicích se nejedná o automatickou činnost v každém okamžiku. I u těchto autonomně pracujících strojů nastanou situace, kdy je zásah obsluhy potřeba. Jedná se o situace, kdy např. měníme výrobní postup či požadovaný počet vyráběných kusů, nebo na stroji nastane porucha apod. V těchto případech musí do chodu stroje zasáhnout člověk. Tento zásah může být proveden dvěma základními způsoby:

- pomocí ovládacích a kontrolních prvků přímo u stroje,
- z nadřazeného řídicího systému.

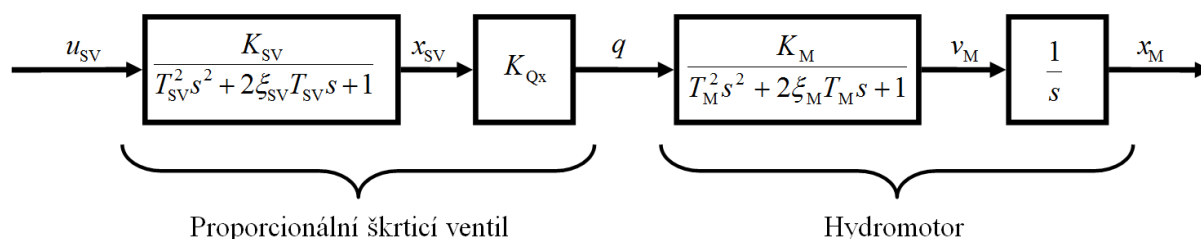
Mezi ovládací a kontrolní prvky lze zařadit například různá tlačítka, spínače, přepínače, LED diody, zobrazovače nebo displeje (i dotykové). K těmto účelům má řídicí systém Athena II SBC dostatek rozhraní. K dispozici je 24 digitálních vstupů/výstupů (jako vstupní nebo výstupní se nastavuje vždy celý port obsahující 8 vstupů/výstupů) a výstup na CRT a LCD displej s rozlišením až 1280×1024×32 nebo 1920×1440×16 obrazových bodů.

Druhou možností je ovládat řídicí systém nadřazeným řídicím systémem. V takovýchto případech lze pro komunikaci použít průmyslovou sběrnici, např. Profibus, CAN apod. Ke komunikačním účelům lze použít rozhraní RS232/485, USB či Ethernet. Řízení nadřazeným řídicím systémem s výhodou využijeme u rozsáhlejších aplikací, u kterých řídíme více strojů najednou. Nadřazený řídicí systém pak předává veškeré příkazy podřízenému řídicímu systému, který řídí jeden či více strojů. Návrh komunikace s nadřazeným řídicím systémem by se prováděl pro konkrétní aplikaci, s ohledem na počet použitých řídicích systémů, průmyslovou sběrnici používanou v závodě apod.

## 7 Návrh algoritmu řízení

Řízená soustava sestává ze tří členů: proporcionálního škrťicího ventilu, přímočarého hydromotoru a technologie řezání materiálu. Řezná síla je do modelu zavedena jako poruchová veličina působící na hydromotor.

Dynamické vlastnosti proporcionálního škrťicího ventilu odpovídají proporcionálnímu dynamickému členu se setrvačností druhého řádu. Hydromotor popisujeme stejně, na výstupu je navíc doplněný o integrační člen (přechod od rychlosti hydromotoru na polohu pístnice hydromotoru). Řízenou soustavu lze znázornit blokovým schématem na obrázku 7.1.



**Obrázek 7.1** Blokové schéma řízené soustavy tvořené proporcionálním škrťicím ventilem a hydromotorem

U pásových pil na řezání kovu je potřeba řídit rychlost pohybu hydromotoru. Řízená soustava je tedy tvořena dvěma proporcionálními členy se setrvačností druhého řádu. Je tedy jasné, že musíme použít regulátor s integrační složkou. Bez integrační složky by přechodová charakteristika vykazovala trvalou regulační odchylku i na skokový signál ve tvaru polohy. V knize [VÍTEČEK, VÍTEČKOVÁ, 2011] je uvedeno několik experimentálních metod, ke kterým nepotřebujeme znát matematický popis řízené soustavy. Zde budou popsány dvě metody, pomocí kterých byl spočten regulátor PI.

## 7.1 Metoda kritických parametrů

První metodou je hojně používaná metoda kritických parametrů (Ziegler-Nichols). V programu SIMULINK byl uzavřený regulační obvod přiveden na kmitavou mez stability (při vyřazené integrační činnosti). Odečtena byla kritická perioda  $T_k = 0,27\text{ s}$  při nastaveném kritickém zesílení  $K_{pk} = 7$ . Podle metody kritických parametrů se stavitelné parametry regulátoru určí takto

$$K_p^* = 0,45 \cdot K_{pk} = 0,45 \cdot 7 = 3,15, \quad (9)$$

$$T_i^* = \frac{T_k}{1,2} = \frac{0,7}{1,2} = 225\text{ ms}. \quad (10)$$

## 7.2 Metoda překmitu

Druhou použitou metodou, rovněž převzatou z [VÍTEČEK, VÍTEČKOVÁ, 2011], je metoda překmitu. Zesílení proporcionálního regulátoru upravujeme tak dlouho, až je na přechodové charakteristice patrný relativní překmit 0,1 – 0,6. Poté z přechodové charakteristiky odečteme parametry potřebné pro výpočet. Doba dosažení prvního maxima je  $t_m = 0,043\text{ s}$ , relativní překmit

$$\kappa = \frac{y_m - y(\infty)}{y(\infty)} = \frac{1,07 \cdot 10^{-3} - 0,8 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} = 0,34, \quad (11)$$

zesílení otevřeného regulačního obvodu

$$b' = \frac{y(\infty)}{w_0} = \frac{0,8 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} = 0,8, \quad (12)$$

$$K_{po} = \frac{b'}{1 - b'} = \frac{0,8}{1 - 0,8} = 4. \quad (13)$$

Dále se určí pomocný parametr

$$A' = 1,152\kappa^2 - 1,607\kappa + 1 = 1,152 \cdot 0,34^2 - 1,607 \cdot 0,34 + 1 = 0,59. \quad (14)$$

Stavitelné parametry PI regulátoru určíme podle vztahů

$$K_p^* = A' \cdot K_{p0} = 0,59 \cdot 4 = 2,35, \quad (15)$$

$$T_I^* = 0,86 \cdot A' \cdot t_m \cdot K_{p0} = 0,86 \cdot 0,59 \cdot 0,043 \cdot 4 = 86 \text{ ms}. \quad (16)$$

Obě experimentální metody dávají výsledky pro standardní typ regulátoru (bez interakce) s přenosem

$$G_R(s) = K_p \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right). \quad (17)$$

## 8 Ověření navrženého řídicího algoritmu

Řídicí algoritmus byl nejprve vypočten ze znalosti matematického modelu řízené soustavy, v rámci této práce je to hydraulický pohon pásové pily na řezání kovu. První ověření správnosti návrhu proběhlo v prostředí SIMULINK. Poté byl řídicí algoritmus naprogramován do řídicího systému Athena II SBC a otestován v rámci HiL simulace. Posledním potvrzením funkčnosti navrženého řídicího algoritmu bylo testování na reálném hydraulickém obvodu. Ten byl zapojen tak, aby co nejvěrněji reprezentoval chování pásové pily na řezání kovu.

### 8.1 Programování řídicího systému

Řídicí systém Athena II SBC je programován v jazyce C. Výrobce k řídicímu systému dodává ovladače pro operační systémy DOS, Linux, QNX, Windows CE a Windows XP. Ovladače v aktuální verzi, stejně jako dokumentaci k řídicímu systému, lze stáhnout ze stránek výrobce [ATHENA II SBC, 2012]. Ovladače obsahují knihovnu potřebnou pro programování AD a DA převodníků (včetně jejich autokalibrace), obvodu Watch dog, a funkcí pro čítače, časovače a uživatelské přerušení. Dokumentaci k ovladačům lze nalézt na stránkách [MAIN PAGE, 2009]. Tu je možno i stáhnout, nebo dále prohlížet kliknutím na jednotlivé odkazy, dokumenty jsou ve formátu html. U jednotlivých funkcí jsou uvedeny i příklady.

Pro programování řídicího systému byl použit software Microsoft Visual Studio 2005. Program byl vytvářen v rámci projektů Visual C++ (Win32 Console Application). Ovladače dodávané výrobcem obsahují 3 typy souborů s příponami lib, dll a h (název všech souborů je dscud). Soubor s příponou lib musíme v našem projektu přidat do složky *Resource Files* (klikneme pravým tlačítkem na složku a zvolíme *Add – Existing Item...*). Hlavičkový soubor s příponou h musíme nakopírovat do odpovídající složky (pokud si projekt pojmenujeme např. „regulator“, tak do složky regulator\regulator). V této složce jsou umístěny i ostatní používané hlavičkové soubory. Poslední soubor, dynamickou knihovnu s příponou dll nakopírujeme přímo na cílové zařízení do složky, v které bude umístěn i spustitelný soubor.

Velmi důležitým nastavením, které musíme provést, je volba správné provozní knihovny. Toto nastavení provedeme v menu *Project – Properties* (před tímto slovem je

ještě uveden název projektu). Zde vybereme *Configuration Properties – C/C++ – Code Generation*. V tomto okně v položce *Runtime Library* nastavíme místo výchozího nastavení *Multi-threaded Debug DLL (/MDd)* položku *Multi-threaded Debug (/MTd)*. Bez tohoto nastavení by nebylo možné spouštět vygenerovaný spustitelný soubor na zařízeních bez nainstalovaného prostředí .NET.

## 8.2 Použití knihoven pro AD a DA převodník

Pro ukázkou si na tomto místě popíšeme funkci pro převod digitálního čísla na analogový výstup. Pro tuto operaci se používá funkce s názvem `dscDAConvert`, jejímiž parametry jsou proměnné typu `DSCB` (handle odkazující se na desku), `BYTE` (proměnná pro vybraný DA kanál) a `DSCDACODE` (proměnná pro digitální číslo, které chceme převést na analogový výstup). Příklad převedení čísla 4095 (digitální čísla se zadávají z rozsahu 0÷4095, to proto, že DA převodník je 12b) na analogový výstup č. 0 demonstruje obrázek 8.1.

```
DSCB dscb;  
BYTE channel;  
DSCDACODE output_code;  
  
...  
  
channel = 0;  
output_code = 4095;  
  
if ((result = dscDAConvert(dscb, channel, output_code)) != DE_NONE)  
    return result;
```

Obrázek 8.1 Příklad převedení digitálního čísla na analogový výstup

Před samotným použitím je nutno oba převodníky nastavit. Nastavení si ukážeme u AD převodníku, kde je názornější. Pro nastavení se používá funkce `dscADSettings`. Ta má dva parametry, a to typu `DSCB` a `DSCADSETTINGS` (jedná se o strukturu, jejíž jednotlivé prvky jsou typu `BYTE`). Struktura `DSCADSETTINGS` obsahuje kromě jiných následující prvky:

- `current_channel` (kanál vybraný pro AD převod),
- `gain` (zesílení použité při AD převodu, pro zesílení 1 zapíšeme hodnotu 0, pro zesílení 2 hodnotu 1, pro zesílení 4 hodnotu 2, a pro zesílení 8 hodnotu 3),
- `polarity` (rozsah použitý při AD převodu, 0 pro bipolární, 1 pro unipolární),
- `load_cal` (tato proměnná určuje, zda bude načteno nastavení z paměti EEPROM – hodnota 1, nebo zda bude zapsáno uživatelsky provedené nastavení – hodnota 0).

Ve výše uvedeném výčtu nejsou vypsaný všechny prvky, ale jen ty, které byly používány. Prvky struktury, které nejsou nijak nastaveny, zůstanou na výchozí hodnotě. Zapsání nastavení AD převodníku je zobrazeno na obrázku 8.2.

```
DSCB dscb;  
DSCADSETTINGS dscadsettings;  
  
...  
  
dscadsettings.polarity = 0;  
dscadsettings.gain = 0;  
dscadsettings.load_cal = 0;  
dscadsettings.current_channel = 0;  
  
if ((result = dscADsetSettings (dscb, &dscadsettings)) != DE_NONE)  
    return result;
```

Obrázek 8.2 Zapsání nastavení pro AD převodník

### 8.3 Perioda vzorkování číslicového regulátoru

Řídicí systém Athena II SBC je číslicový. Regulátor byl řešen v cyklu „do while“. Pro potřeby řízení je potřeba zajistit konstantní periodu vzorkování (konstantní dobu trvání cyklu „do while“). Po naprogramování regulátoru bylo zjištěno, že doba vykonávání jednoho cyklu smyčky „do while“ je menší než 1 ms. Vzorkovací perioda byla používána v řádech jednotek milisekund (tedy velmi malá), a proto byl regulátor seřizován jako analogový. Konstantní doba vzorkovací periody byla zajištěna použitím funkce *Sleep* (z knihovny *Windows*) a funkce *clock* (z knihovny *time*). Pomocí funkce *clock* je na začátku a na konci cyklu „do while“ změřen čas mikroprocesoru. Po odečtení těchto dvou časů zjistíme dobu vykonávání smyčky. Poté již stačí funkci *Sleep* předat jako parametr zbývající dobu do vzorkovací periody. Výše popsany postup, realizovaný v hlavní funkci programu *main*, je zobrazen na obrázku 8.3.

```
do  
{  
    zac=clock(); //zaznamenani casu uc na zacatku smycky  
    <<tělo cyklu>>  
    kon=clock(); //zaznamenani casu uc na konci smycky  
    cekani(zac, kon, tvz);  
}  
while (1); //nekonecna smycka  
return 0;  
  
void cekani (int zacatek, int konec, int vzorkovaci)  
{  
    int delka_kodu=konec-zacatek;  
    if (delka_kodu<vzorkovaci) //doplneni cekani v pripade, kdy mame prebytecny cas  
        Sleep(vzorkovaci-delka_kodu);  
}
```

Obrázek 8.3 Čekací smyčka zajišťující konstantní dobu vzorkovací periody



## 8.4 Simulace HiL

Pro simulaci HiL bylo nutno zvolit konkrétní hodnoty všech parametrů simulačního modelu. Za parametry hydromotoru byly dosazeny hodnoty pohonu elektrohydraulického výukového stendu katedry Automatizační techniky a řízení VŠB-TU Ostrava umístěného v laboratoři C107 v budově Centra pokročilých inovačních technologií (CPIT). Tyto hodnoty jsou převzaty z práce [SZYMECZEK, 2010] a shrnuty v tabulce 8.1. Rozměrově tento hydromotor odpovídá pohonům, které se používají u poloautomatických pásových pil.

**Tabulka 8.1 Parametry hydromotoru použitého v modelu pásové pily na řezání kovu**

<i>Parametr</i>	<i>Hodnota</i>
Vlastní frekvence $f_{\text{HM}}$ [Hz]	87,4
Zdvih $x_{\text{MAX}}$ [m]	0,12
Průměr válce $d$ [m]	0,063
Průměr pístnice $d_A$ [m]	0,045
Hmotnost $m$ [kg]	50
Tlumení $b$ $\left[ \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}} \right]$	50000
Svodová propustnost $G_i$ $\left[ \frac{\text{m}^3}{\text{Pa} \cdot \text{s}} \right]$	$1 \cdot 10^{-12}$
Modul objemové stlačitelnosti kapaliny $K$ [Pa]	$1,4 \cdot 10^9$

Parametry proporcionálního škrticího ventilu byly zvoleny po konzultaci s vedoucím diplomové práce a s výrobcem těchto ventilů. Shrnuty jsou v tabulce 8.2.

**Tabulka 8.2 Parametry proporcionálního škrticího ventilu použitého v modelu pásové pily na řezání kovu**

<i>Parametr</i>	<i>Hodnota</i>
Vlastní frekvence $f_{\text{SV}}$ [Hz]	10
Tlumení $\xi_{\text{SV}}$ [-]	0,9
Průtokové zesílení $B_{\text{SV}}$ $\left[ \frac{\text{m}^3}{\sqrt{\text{Pa}} \cdot \text{s}} \right]$	$5 \cdot 10^{-9}$
Krytí šoupátka $x_{\text{SV0}}$ [-]	0

Pro model řezání bylo potřeba zvolit tuhost pružiny (která reprezentuje tuhost pilového pásu) a vyplnit tabulku pro určení řezné rychlosti na základě řezné síly a počtu zubů v záběru (ten je zadáván bezrozměrně, tedy z rozsahu 0÷1). Tuhost pružiny byla zvolena tak, aby se řezná síla pohybovala okolo  $F_R = 800 \text{ N}$ , tedy  $k_p = 100000 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ . Model je doplněn o snímač rychlosti, který je reprezentován zesílením o hodnotě

$$K_{\text{SN}} = \frac{U_{\text{MAX}}}{v_{\text{MAX}}} = \frac{10}{0,002} = 5000 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}}. \quad (18)$$

Regulátor byl v jazyce C naprogramován v tzv. paralelním tvaru, tzn., že přenos má tvar

$$G(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s}, \quad (19)$$

kde  $r_0$  je proporcionální konstanta regulátoru,  $r_{-1}$  je integrační konstanta regulátoru. Přepočítání stavitelných parametrů mezi regulátorem s přenosem ve standardním tvaru (17) a paralelním tvaru (19) je v tomto případě velmi triviální [VÍTEČEK, VÍTEČKOVÁ, 2008]

$$r_0 = K_p, \quad (20)$$

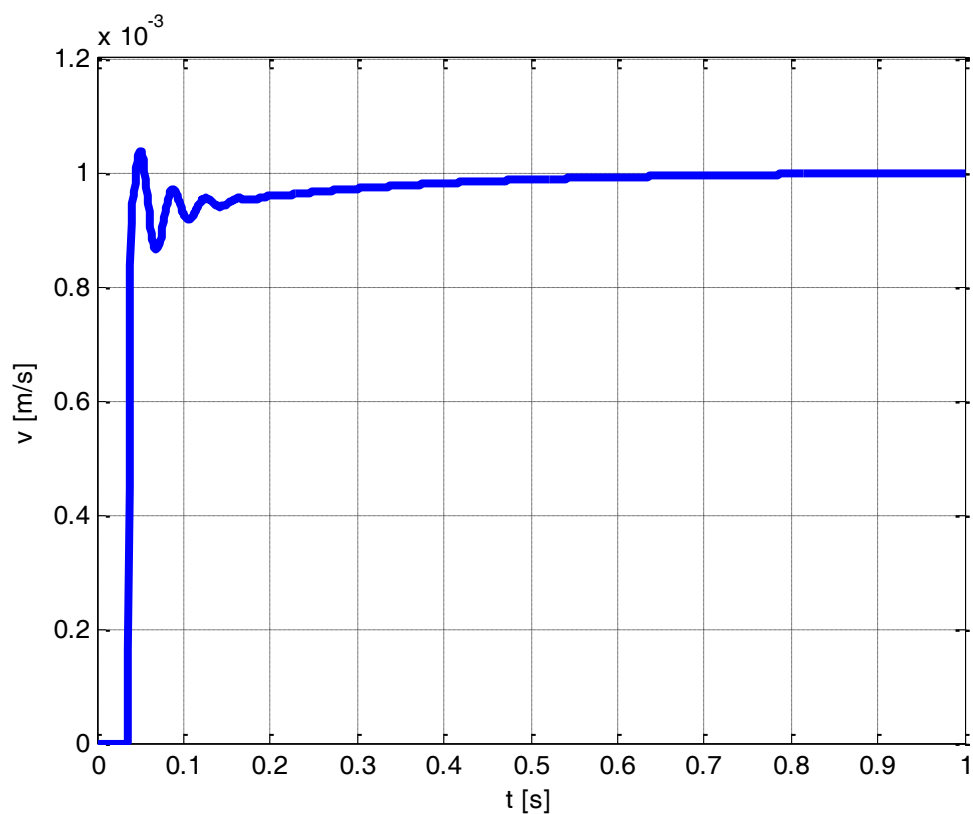
$$r_{-1} = \frac{K_p}{T_1}. \quad (21)$$

Hodnoty stavitelných parametrů (9), (10) a (15), (16) přepočtené podle vztahů (20) a (21) jsou zobrazeny v tabulce 8.3.

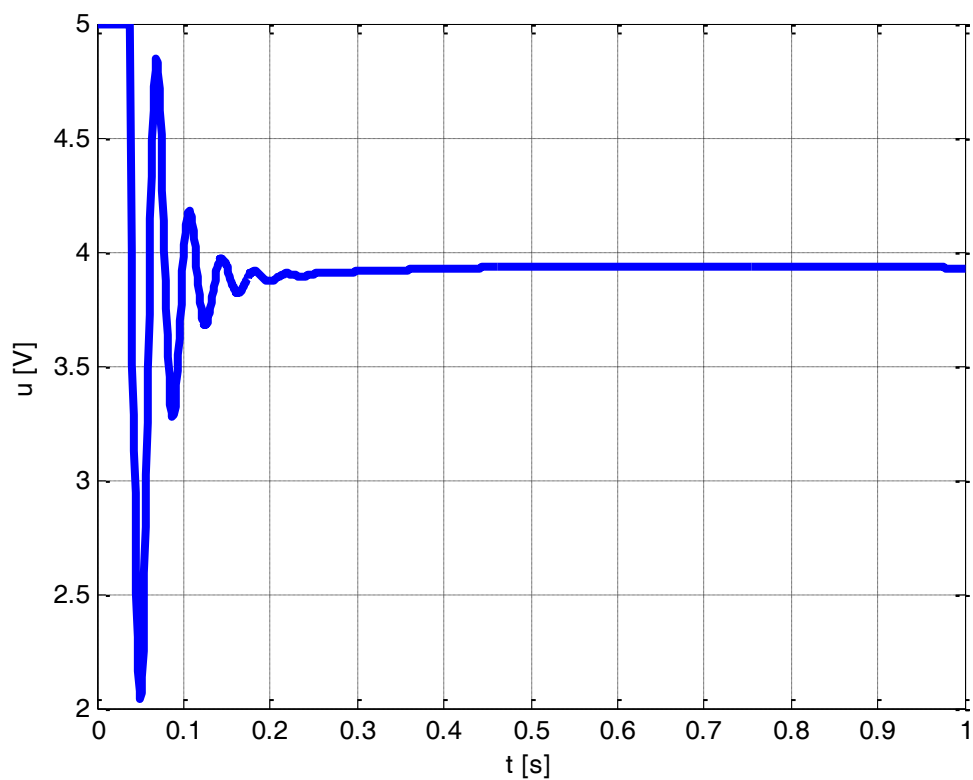
**Tabulka 8.3 Hodnoty stavitelných parametrů PI regulátoru**

Metoda	$r_0$	$r_{-1}$
<b><i>Metoda kritických parametrů (Ziegler-Nichols)</i></b>	3,15	14
<b><i>Metoda překmitu</i></b>	2,35	27,3

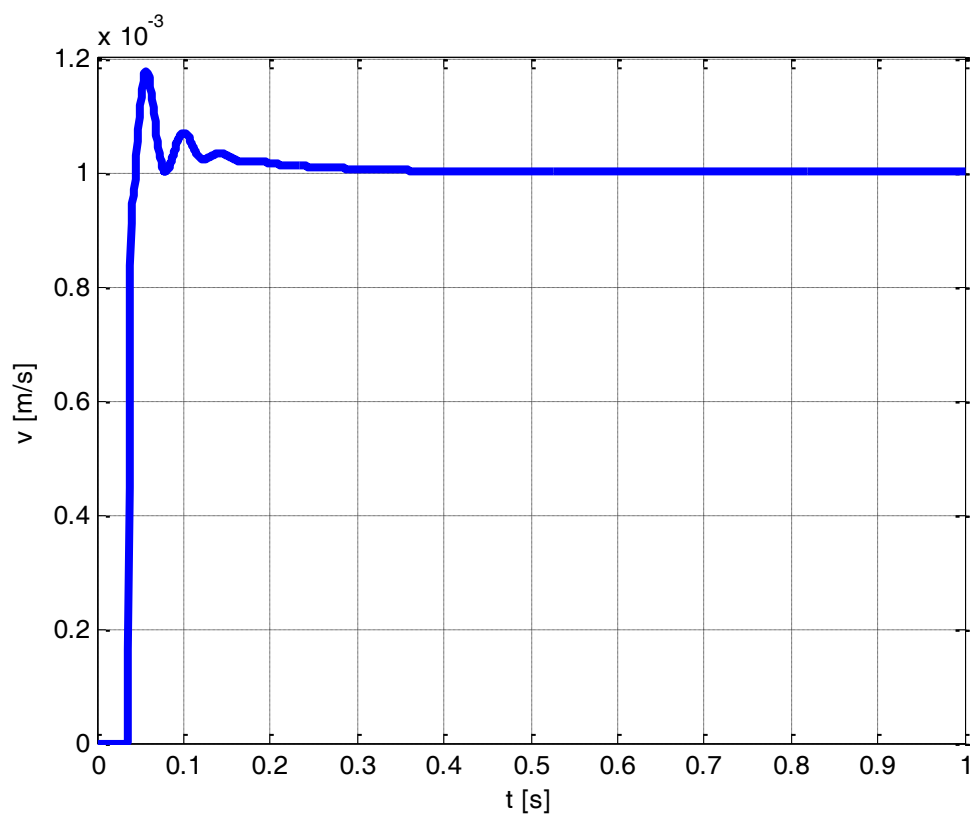
Na obrázcích 8.4 a 8.5 jsou průběhy získané s regulátorem seřízeným metodou Ziegler-Nichols, na obrázcích 8.6 a 8.7 pak metodou překmitu.



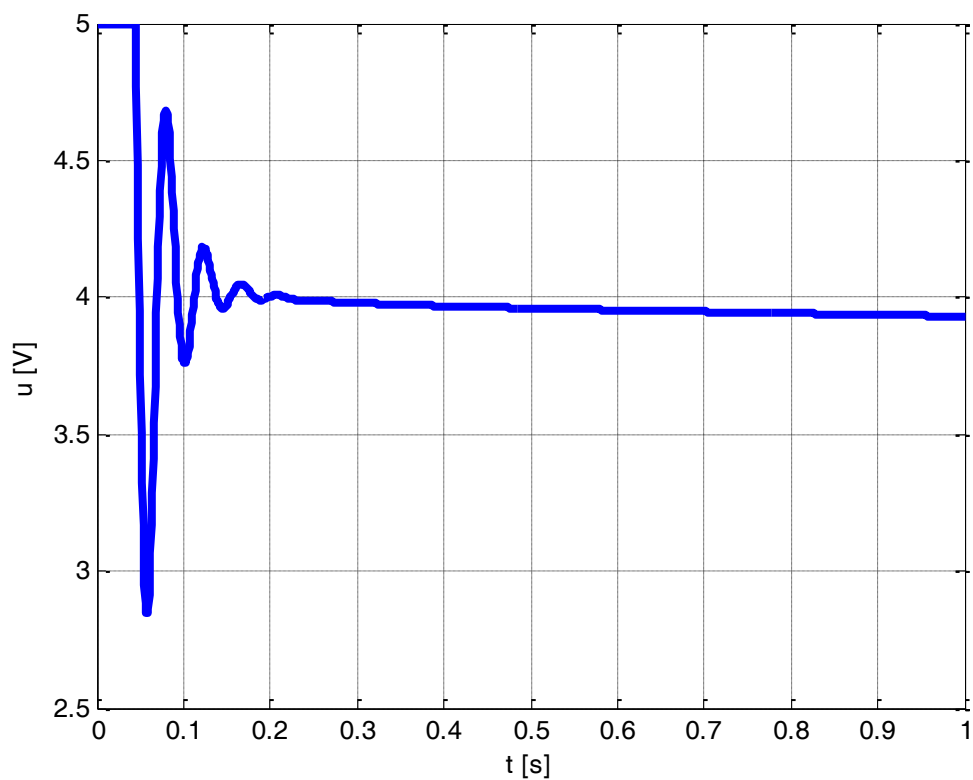
Obrázek 8.4 Rychlost hydromotoru (Ziegler-Nichols)



Obrázek 8.5 Napětí na proporčním škrticím ventilu (Ziegler-Nichols)

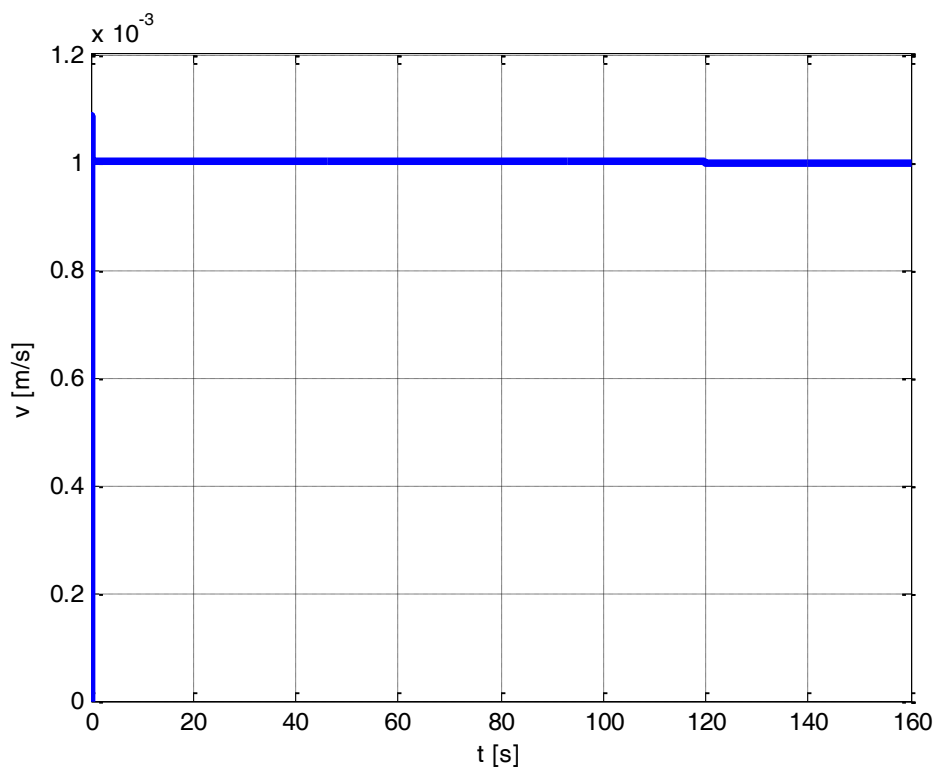


Obrázek 8.6 Rychlost hydromotoru (metoda překmitu)

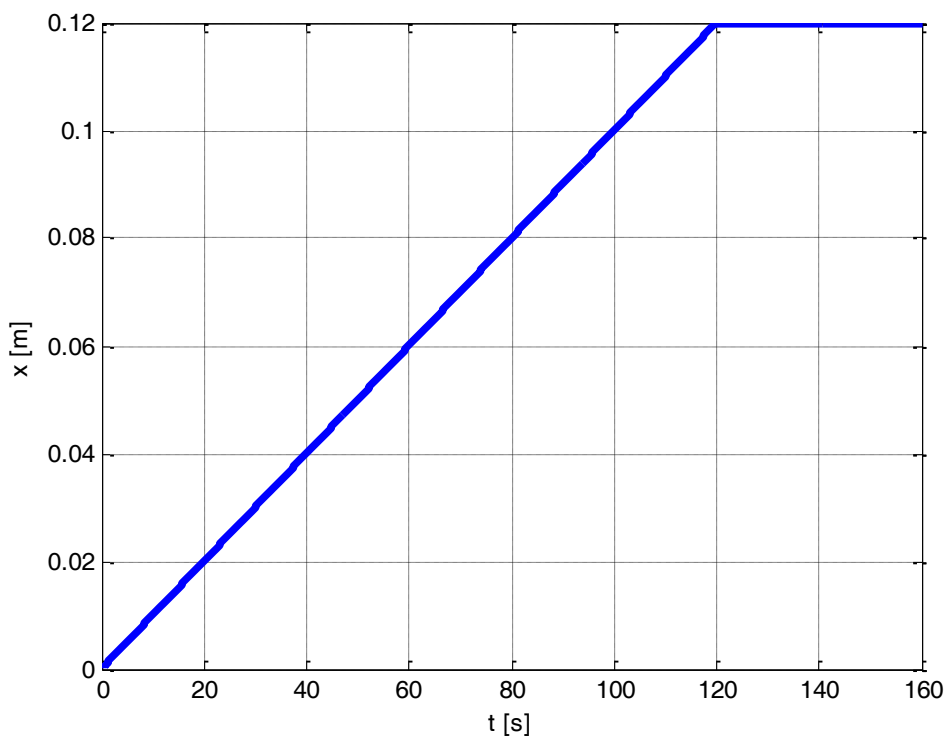


Obrázek 8.7 Napětí na proporcionálním škrticím ventilu (metoda překmitu)

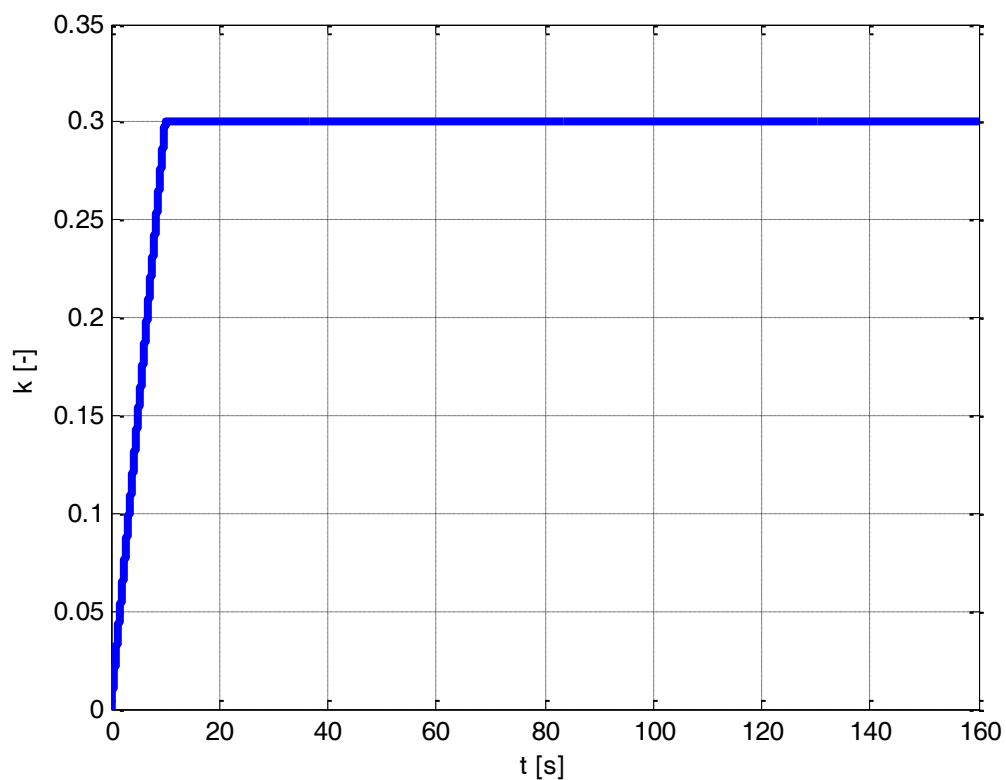
Odladěním parametrů na hodnoty  $r_0 = 1$  a  $r_{-1} = 20$  byl získán průběh s menším počtem kmitů a relativním překmitem 0,1 (10%). Na obrázcích 8.8 ÷ 8.11 je zobrazen průběh celého procesu řezání.



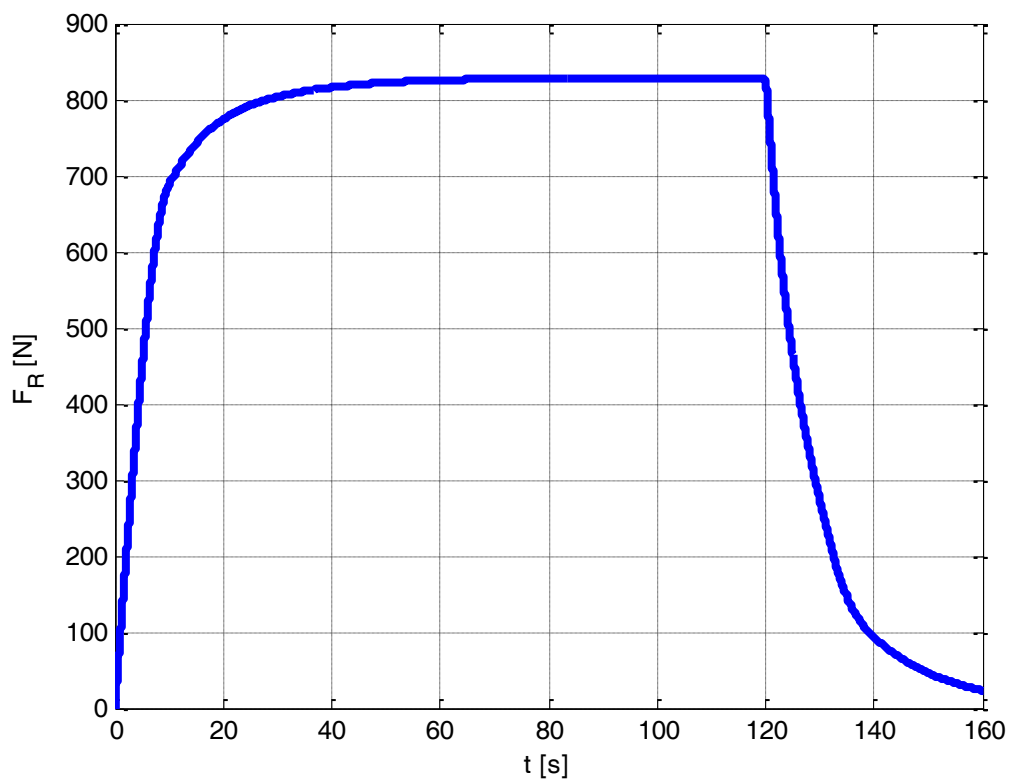
Obrázek 8.8 Rychlost hydromotoru



Obrázek 8.9 Poloha hydromotoru



Obrázek 8.10 Poměrný počet zubů v záběru



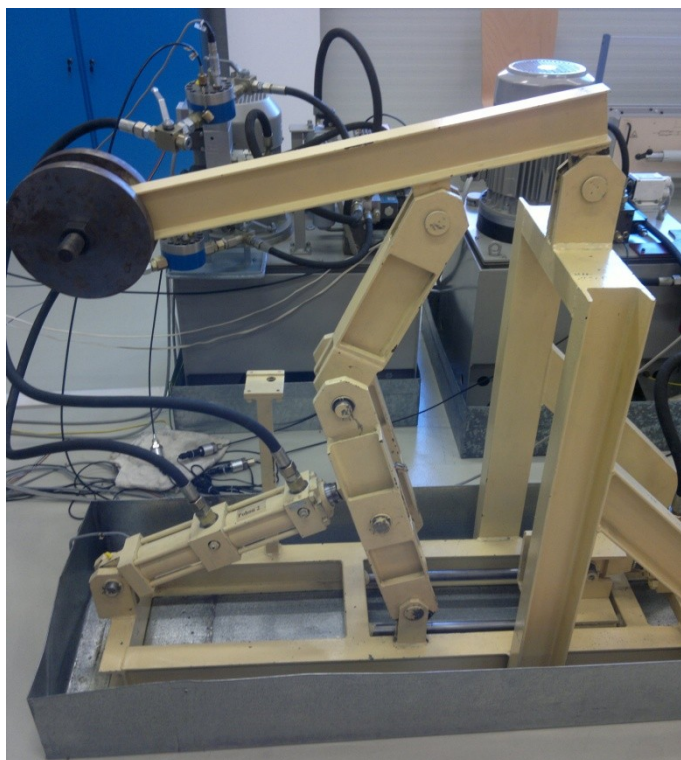
Obrázek 8.11 Řezná síla

### 8.5 Připojení řídicího systému k elektrohydraulickému stendu

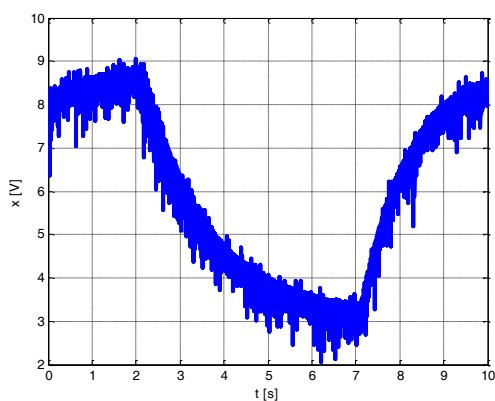
Funkčnost řídicího systému Athena II SBC byla nejprve testována na elektrohydraulickém výukovém stendu (obrázek 8.12), na kterém byla zkoušena polohová regulace. Před regulací bylo nutno použít filtr typu dolní propust (RC článek), jelikož signál ze snímače polohy obsahoval značný šum (obrázek 8.13). Po použití filtru s časovou konstantou

$$\tau = R \cdot C = 4,7 \cdot 10^3 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} = 10,34 \text{ ms} \quad (22)$$

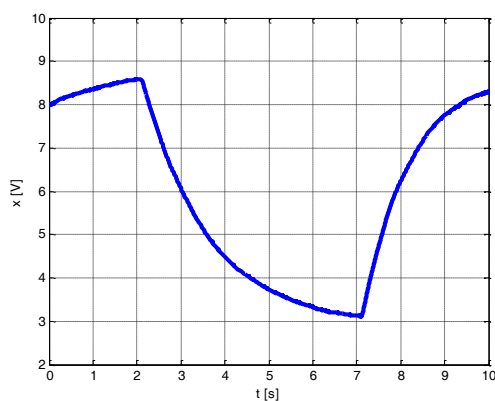
bylo možno signál (obrázek 8.14) použít pro polohovou regulaci.



Obrázek 8.12 Elektrohydraulický výukový stend

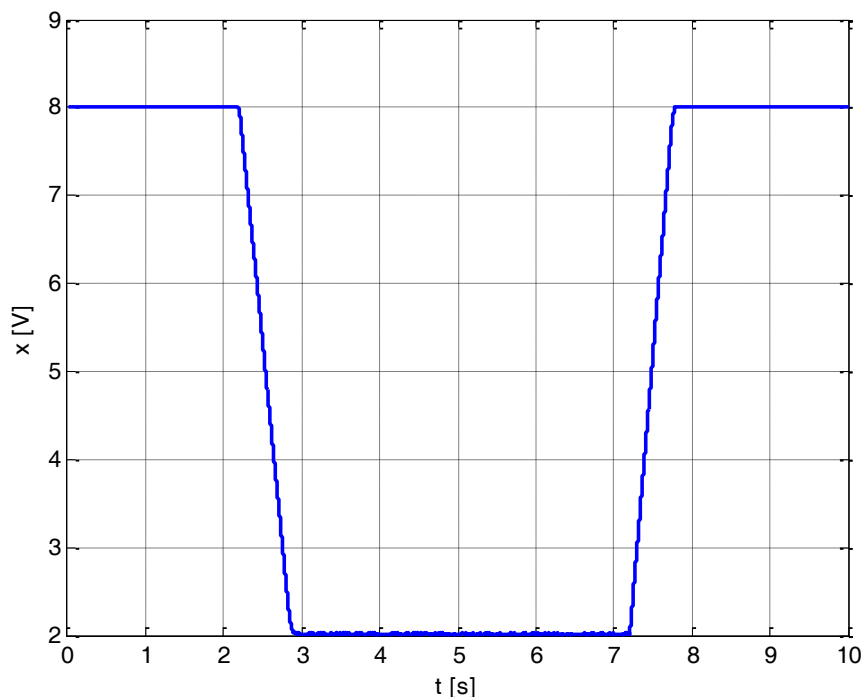


Obrázek 8.13 Napětí ze snímače polohy bez filtru



Obrázek 8.14 Napětí ze snímače polohy s filtrem

Pro řízení polohy (řízená soustava obsahuje integrační člen) byl použit P regulátor se zesílením  $K_p = 30$ . Žádaná hodnota byla periodicky měněna z 2 V na 8 V (z 0,024 m na 0,096 m). Průběh polohy je zobrazen na obrázku 8.15.

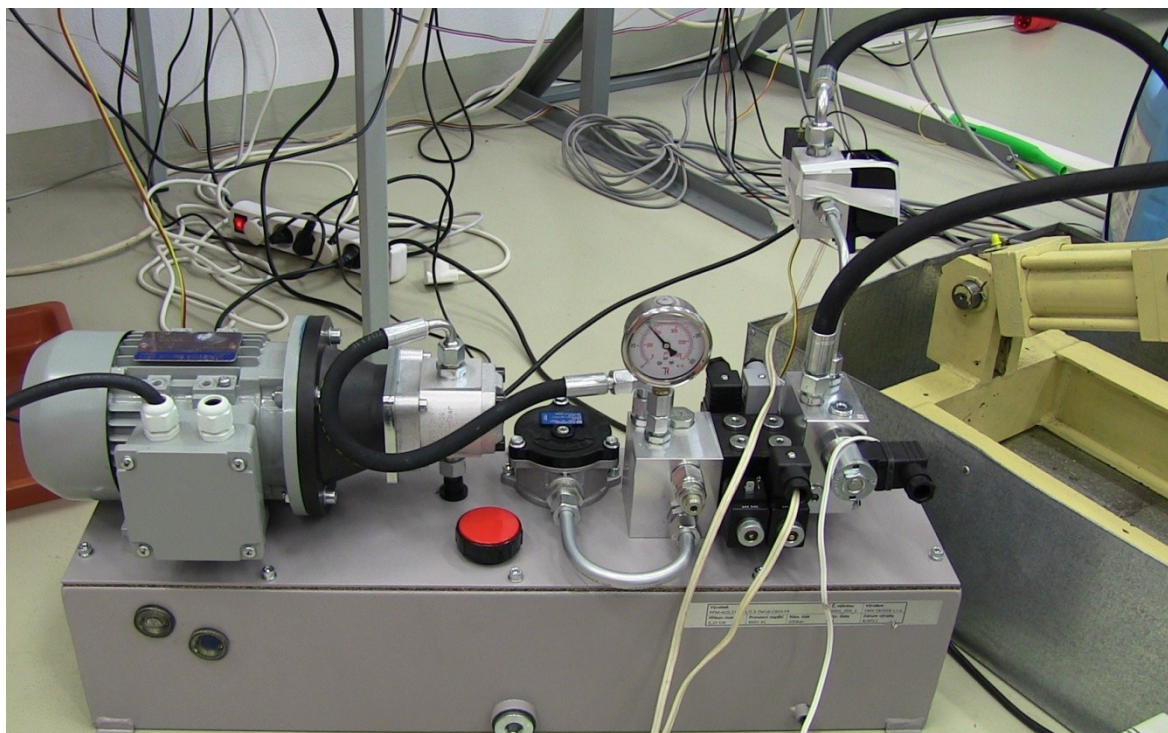


Obrázek 8.15 Průběh regulované polohy

## 8.6 Připojení řídicího systému k agregátu pásové pily na řezání kovu

Firmou FMV-Design byl zapůjčen hydraulický agregát používaný pro pohon pásové pily na řezání kovu během samotného procesu řezání. Agregát je zobrazen na obrázku 8.16 a obsahuje elektromotor, hydrogenerátor, filtry, pojistné a jednosměrné ventily, dva třístavové ventily, hydraulický zámek a proporcionální škrťací ventil, kterým je řízena rychlost řezání. Tento agregát byl připojen k hydromotoru elektrohydraulického stendu, jehož parametry jsou popsány v tabulce 8.1. U pásových pil na řezání kovu se používají dva typy řízení. Jedná se buď o regulaci na konstantní rychlost, nebo o regulaci na konstantní sílu (měřenou snímačem stlačení pilového pásu) [FMV-DESIGN, 2012]. V daných laboratorních podmínkách bylo možné vyzkoušet regulaci rychlosti.





**Obrázek 8.16** Hydraulický agregát pro řezání u pásových pil na řezání kovu

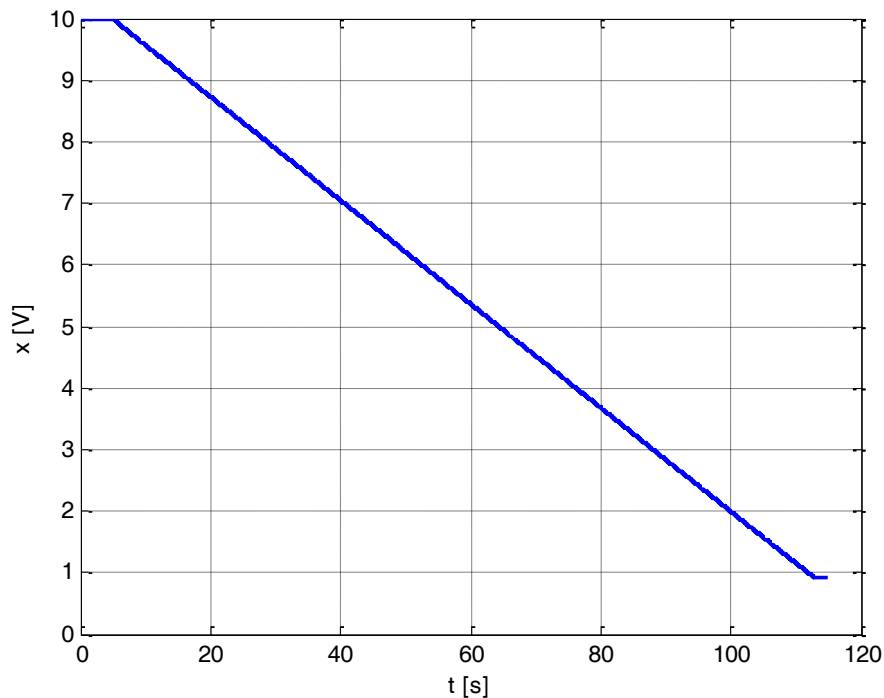
V laboratoři dochází k značnému rušení, což je patrné z obrázku 8.13. Ani po použití filtru typu dolní propust nebyl signál úplně vyhlazen. Ovšem potlačení rušivého signálu bylo pro polohovou regulaci dostatečné. Použitý hydromotor je vybaven pouze snímačem polohy. Pro regulaci rychlosti je třeba signál o poloze derivovat (ve skutečnosti je provedena diference, jelikož řídicí systém je číslicový). Zde tedy vzniká značný problém zesílení malého rušivého signálu obsaženého ve vyfiltrovaném signálu polohy.

Z tohoto pohledu je nízká vlastní frekvence použitého proporcionálního škrťacího ventilu výhodná, protože působí jako přirozený filtr. U proporcionálního škrťacího ventilu je nutné vhodně nastavit jeho statickou charakteristiku tak, abychom byli schopni řídicím napětím  $0 \div 5$  V dosáhnout požadovaného průtoku, a tím pádem i požadované rychlosti. Regulovaná rychlost bývá přibližně  $v = 1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Z tohoto důvodu není vhodná příliš malá vzorkovací perioda. Rychlost je počítána podle vztahu

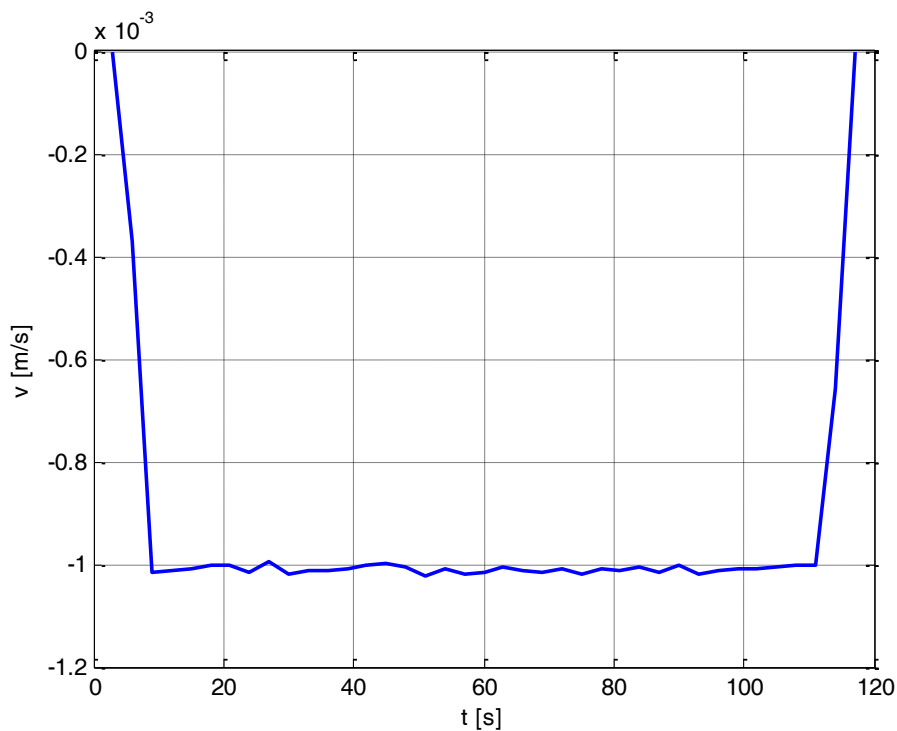
$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}. \quad (23)$$

Při vzorkovací periodě  $T = \Delta t = 1 \text{ ms}$  a požadované rychlosti  $v = 1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , by byla změna polohy rovna  $\Delta x = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ , což při maximálním zdvihu  $0,12 \text{ m}$  odpovídá změně napětí  $\Delta U = 8,3 \cdot 10^{-5} \text{ V}$ .

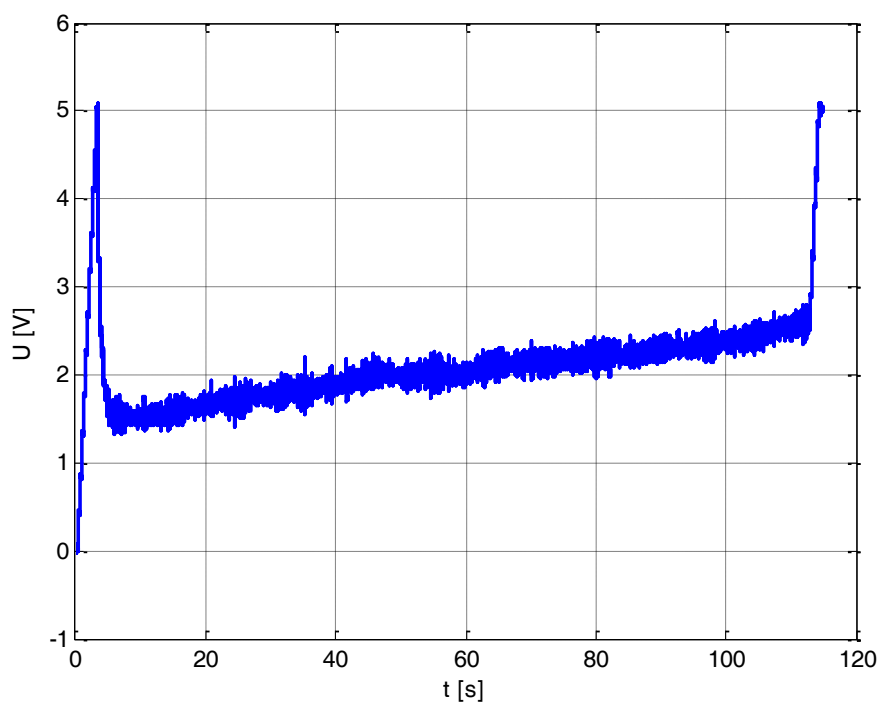
Na následujících obrázcích je ukázána regulace s parametry regulátoru v paralelním tvaru  $r_0 = 3$  a  $r_{-1} = 2$ . Průběhy jsou zobrazeny pro dvě různé periody vzorkování (v popisících grafů).



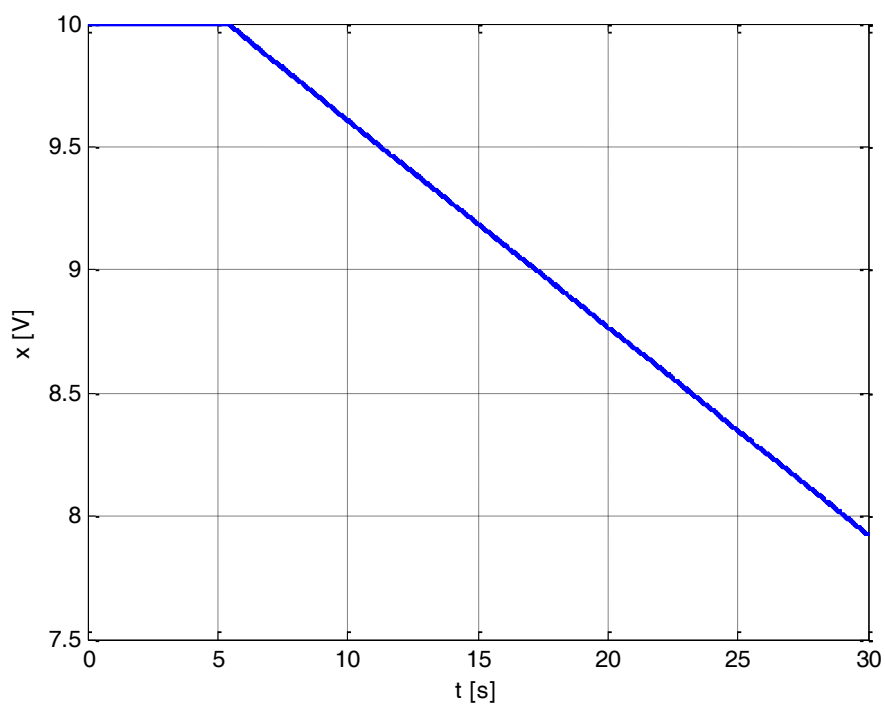
Obrázek 8.17 Poloha pístnice hydromotoru ( $T=0,05$  s)



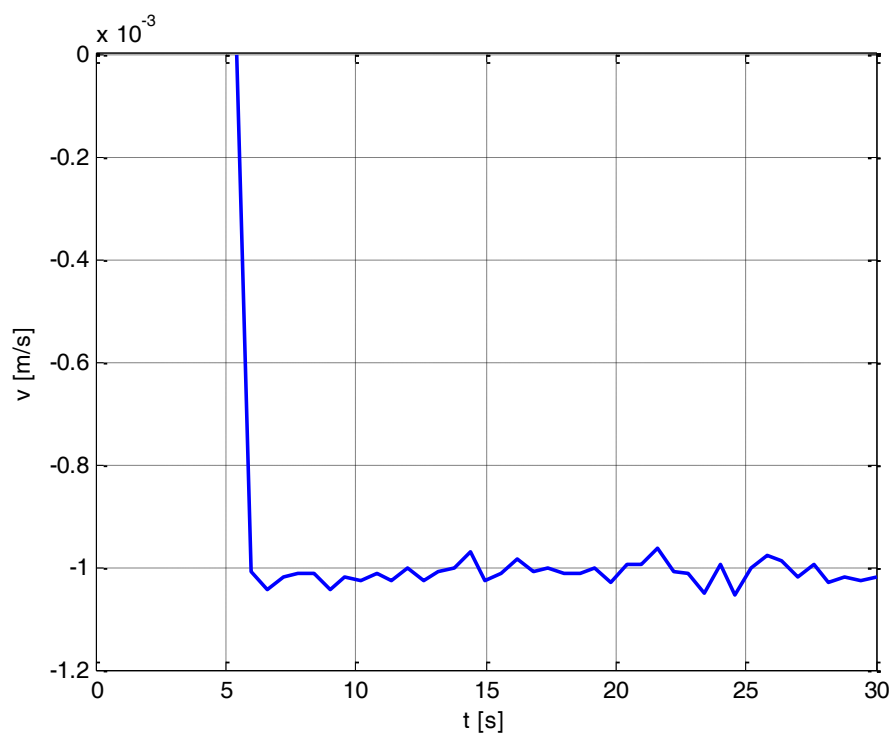
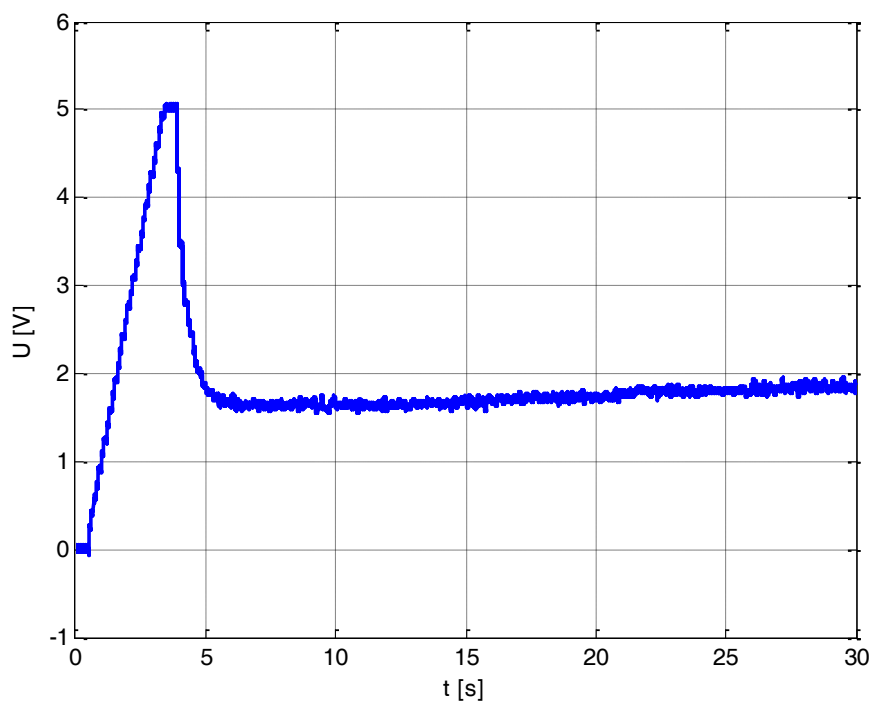
Obrázek 8.18 Rychlost hydromotoru ( $T=0,05$  s)



Obrázek 8.19 Řídicí napětí proporcionálního škrticího ventilu ( $T=0,05$  s)



Obrázek 8.20 Poloha pístnice hydromotoru ( $T=0,1$  s)

Obrázek 8.21 Rychlost hydromotoru ( $T=0,1$  s)Obrázek 8.22 Řídicí napětí proporcionálního škrticího ventilu ( $T=0,1$  s)

## 9 Závěr

Cílem diplomové práce byl návrh embedded řídicího systému vhodného pro řízení hydraulických pohonů. V úvodu jsou popsány aplikace, v kterých se používají hydraulické pohony, vyzdvihnuty jejich výhody a nevýhody. V této části se rovněž nachází popis regulačního ventilu, jenž je z pohledu řízení nejdůležitějším prvkem hydraulického obvodu a snímačů polohy, která je nejčastější regulovanou veličinou.

Další kapitoly se věnují definici embedded řídicích systémů a praktické aplikaci hydraulických pohonů, pásovým pilám na řezání kovu. U pásových pil na řezání kovu jsou výhradně používaným pohonem právě pohony hydraulické. Používají se k řízení nejdůležitější funkce, kterou je proces samotného řezání, dále pak např. k upnutí řezaného materiálu či jeho přepravě.

Podrobně je popsán hydraulický obvod určený k samotnému řezání, jeho prvky a funkce. Hlavním řídicím prvkem je proporcionální škrticí ventil, kterým je řízena řezná rychlost pilového pásu. Řídicí algoritmy byly ověřovány simulací Hardware in the Loop, která vyžaduje model řízené soustavy. V modelu byl použit hotový model hydromotoru, dále pak byl sestaven model proporcionálního škrticího ventilu a zjednodušený popis řezání. Jelikož je analytický popis tohoto procesu značně složitý, byl modelován pouze na základě dvou vstupních parametrů, a to řezné síly a poměrného počtu zubů v záběru.

Nejdůležitější částí diplomové práce byl výběr vestavného řídicího systému a jeho následné uvedení do provozu. Vybraný řídicí systém Athena II SBC je pro řízení hydraulických pohonů vhodný pro svou odolnost vůči nepříznivým průmyslovým podmínkám, rozšířenému teplotnímu rozsahu, dostatečnému výpočetnímu výkonu, a také proto, že obsahuje všechny potřebné periferie. Program pro řízení byl naprogramován v jazyce C s využitím výrobcem dodávaných knihoven. Kvůli zničení paměti (flash disk) řídicího systému během používání bylo vyřešeno i sestavení obrazu používaného operačního systému Windows XP Embedded a jeho následné nahrání na paměť novou.

Při návrhu řídicích algoritmů byly použity experimentální metody, které nevyžadují přesný matematický popis řízené soustavy. K experimentům byl využit model sestavený v prostředí Matlab-SIMULINK. Tento model zároveň sloužil při ověřování navržených řídicích algoritmů v rámci Hardware in the Loop simulace.

Po simulačním otestování řídicích algoritmů došlo na další významnou část diplomové práce, a to otestování na reálných zařízeních. Nejprve byla testována regulace

polohy, při které byl zjištěn výskyt značného rušení v laboratoři. Signál o poloze musel být pro odstranění šumu filtrován RC článkem (filtr typu dolní propust). Poté byl, díky zapůjčení od firmy FMV-Design, řídicí algoritmus otestován na hydraulickém agregátu používaném u pásových pil na řezání kovu. Tento plně funkční agregát byl připojen k hydraulickému motoru a testována byla regulace rychlosti. Jelikož použitý hydromotor obsahuje pouze snímač polohy, bylo nutné využít difference polohy. I přes zesílení malého šumu, který byl v signálu o poloze i po filtraci obsažen, bylo řízení rychlosti funkční. Jelikož jsou rychlosti posuvu pilového pásu velmi malé ( $1\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ), ukázalo se nevhodné použití příliš malé vzorkovací periody. Rovněž integrační časová konstanta regulátoru, musela být použita značně menší, než bylo spočteno v rámci návrhu řídicích algoritmů.

Výstupem práce je ověření funkčnosti použitého řídicího systému pro řízení pásových pil na řezání kovu, popsání postup pro tvorbu obrazu operačního systému a jeho nahrávání do paměti, řídicí programy pro polohovou a rychlostní regulaci a návržení řídicích algoritmů. Díky dostatečnému výpočetnímu výkonu je řídicí systém Athena II SBC použitelný i pro použití v plně automatizovaných pásových pilách (CNC), kde může vykonávat nejen samotné řízení řezání, ale i další operace nutné k chodu těchto strojů. Díky obvodu pro sběr dat je možné k řídicímu systému připojit velké množství signálů (20 analogových a 24 digitálních) potřebných k plně automatizovanému (autonomnímu) chodu. Řídicí systém by bylo možné samozřejmě použít i pro jiné aplikace.

## 10 Seznam použité literatury

ARNOLD, K. 2000. *Embedded controller hardware design*. Eagle Rock: LLH Technology Publishing, 2000, 232p. ISBN 1-878707-87-6.

Athena II SBC. 2012. *Diamond Systems* [online]. 2012 [cit. 2012-01-27]. Dostupné z: <<http://www.diamondsystems.com/products/athenaii>>.

BACKÉ, W. 1992. *Servohydraulik*. 6. Auflage. Aachen : Institut für hydraulische und pneumatische Antriebe und Steuerungen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 1992. 270s.

BALÁTEĚ, J. 2004. *Automatické řízení*. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 664 s. ISBN 80-7300-148-9.

Balluff CZ s.r.o.: Lineární odměřování Micropulse - Principy. 2011. *Balluff CZ s.r.o.: Snímače a senzory pro automatizaci* [online]. 2011 [cit. 2012-03-25]. Dostupné z: <[http://www.balluff.cz/btl\\_principy.asp](http://www.balluff.cz/btl_principy.asp)>.

BEDNÁŘ, R. 2002. MS Windows XP Embedded: řešení pro vestavná zařízení. *Automa*. 2002, č. 12. ISSN 1210-9592. Dostupné z: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=28632](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=28632)>.

BOSCH REXROTH, AG. 2007. *4/3-Wege-Regelventile vorgesteuert mit elektrischer Wegrückführung und integrierter Elektronik (OBE)* [online]. RD 29093/09.07. 1. 9. 2007, 20 s. [cit. 2012-03-25]. Dostupné z: <<http://www.boschrexroth.com/various/utilities/mediadirectory/index.jsp>>.

BRYCHTA, J., R. ČEP a J. PETŘKOVSKÁ. 2007. *Technologie II: 1. díl*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007, 122 s. ISBN 978-80-248-1641-8. Dostupné z: <<http://homel.vsb.cz/~cep77/>>.

DSPACE: Embedded Success. 2011. *Exclusive Offers for Academia 2011*. Paderborn, 2011, 36 s. [cit. 2012-03-17]. Dostupné z: <[http://www.dspace.com/shared/data/pdf/2011/ACE-Kit-2011\\_02\\_110808\\_E.pdf](http://www.dspace.com/shared/data/pdf/2011/ACE-Kit-2011_02_110808_E.pdf)>.

DSPACE: Embedded Success. 2012. *DSPACE: ControlDesk Next Generation* [online]. 2012 [cit. 2012-03-17]. Dostupné z: <<http://www.dspace.com/en/inc/home/products/sw/expsoft/controldesk.cfm>>.

FMV-DESIGN. 2012. *Konzultace*. Horní Maršov, 2012.

*GParted -- Live CD/USB/PXE/HD* [online]. 2012 [cit. 2012-03-16]. Dostupné z: <<http://gparted.sourceforge.net/livecd.php>>.

KOPÁČEK, J. a PAVLOK, B. 2005. *Tekutinové mechanismy*. 2.vyd. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2005. 156s. ISBN 80-248-0856-0.

LEWIN, A. R. W. E. 2003. *Embedded system design on a shoestring: achieving high performance with a limited budget*. Burlington: Elsevier Science, 2003, 232p. ISBN 0-7506-7609-4.

Main Page: Universal Driver Documentation. 2009 *Diamond Systems* [online]. 2004-2009 [cit. 2012-04-09]. Dostupné z: <[http://docs.diamondsystems.com/dscud/manual\\_Main\\_Page.html](http://docs.diamondsystems.com/dscud/manual_Main_Page.html)>.

MASI, C. G. 2008. Jednodeskové počítače pro řídicí aplikace. *Control Engineering Česko* [online]. 2008, 9, [cit. 2012-01-22]. Dostupný z: <<http://www.controlengcesko.com/index.php?id=21>>.

Microsoft Windows Embedded. 2011. *Microsoft* [online]. 2011 [cit. 2012-03-16]. Dostupné z: <<http://www.microsoft.com/cze/windowsembedded/>>.

NOSKIEVIČ, P. 1999. *Modelování a identifikace systémů*. 2. vyd. Ostrava: MONTANEX a.s., 1999. 280 s. ISBN 80-7225-030-2. Modely dostupné z: <<http://www.fs.vsb.cz/books/MI/download.htm>>.

NOSKIEVIČ, P. 2002. Návrh přímočarých hydraulických pohonů s ohledem na poměr činných ploch. *Automa*. 2002, č. 7, s. 34-36. Dostupný také z: <<http://www.odbornecasopisy.cz>>. ISSN 1210-9592.

*Pasove-pily.eu: Pásové pily, Pilous, Bomar, Pegas Gonda online na našem e-shopu* [online]. 2008 [cit. 2012-04-06]. Dostupné z: <<http://www.pasove-pily.eu/>>.

PAVLOK, B. 2010. *Hydraulické prvky a systémy. Díl 2.: Řídicí prvky hydrostatických systémů. Příslušenství hydraulických obvodů*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2010, 150 s. ISBN 978-80-248-1827-6.



PAVLOK, B., a další. 2007. *Hydraulická zařízení strojů*. [online] [Citace: 7. květen 2011] Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava. 2007. 116s. Dostupný z WWW: <<http://www.fs.vsb.cz/euprojekty/414/hydraulicka-zarizeni-stroju.pdf>>.

SHAH, B. DIAMOND SYSTEMS. 2009. *Building XPe image for Athena-II SBC: User Document*. V1.0. 2009, 28 s.

Single - board computer. 2012. In *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 2003-03-10, last modified on 2011-05-29 [cit. 2012-01-22]. Dostupné z: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Single-board\\_computer](http://en.wikipedia.org/wiki/Single-board_computer)>.

SZYMECZEK, Michal. 2010. *Konfigurace řídicího systému pomocí simulace Hardware in the Loop*. Ostrava, 2010. 50 s. Bakalářská práce. VŠB-TU Ostrava.

Vestavěný systém. 2012. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2011 [cit. 2012-03-17]. Dostupné z: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Vestav%C4%9Bn%C3%BD\\_syst%C3%A9m](http://cs.wikipedia.org/wiki/Vestav%C4%9Bn%C3%BD_syst%C3%A9m)>.

VÍTEČEK, A. a VÍTEČKOVÁ, M. 2008. *Základy automatické regulace*. 2.vyd. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008. 244s. ISBN 978-80-248-1924-2.

VÍTEČEK, A. a VÍTEČKOVÁ, M. 2011. *Vybrané metody seřizování regulátorů*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2503-8.

VOJÁČEK, A. 2011. Jak pracují LVDT snímače pro měření pohybu či detekci přiblížení? *Automatizace.HW.cz: Vše o elektronice a programování* [online]. 29. 12. 2011 [cit. 2012-03-25]. Dostupné z: <<http://automatizace.hw.cz/jak-pracuji-lvdt-snimace-pro-mereni-pohybu-ci-detekci-priblizeni>>.

WALTERS, R. 1967. *Hydraulic and electro-hydraulic servo systems*. London: Iliffe Books Ltd., 1967. 160p.

WARRING, R. H. 1983. *Hydraulic Handbook*. 8th edition. Morden: Trade & Technical Press Ltd. 1983. 506p.

What is Windows Embedded? 2012. *Microsoft* [online]. 2012 [cit. 2012-03-16]. Dostupné z: <<http://www.microsoft.com/windowseembedded/en-us/evaluate/what-is-windows-embedded.aspx>>.

## 11 Seznam příloh

- A. DVD s digitální verzí práce, návody pro řídicí systém Athena II SBC, soubory pro tvorbu operačního systému, obrazy operačních systémů pro tři velikosti paměti, zdrojovým kódem řídicího programu, zapojením všech konektorů a fotodokumentací k ověřování na reálném zařízení.

**Obsah DVD:**

\Foto

\Kód

\Návody

\ObrazyOS

\Ostatní

\TextDP

\TvorbaOS

\Zapojení